

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Karlo Seleš**

Zagreb, veljača 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Student:

Karlo Seleš

Zagreb, veljača 2015.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Završni rad napravljen je u okviru projekta pod nazivom Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design) koji se provodi u suradnji Fakulteta strojarstva i brodogradnje s tvrtkom Alstom Hrvatska iz Karlovca.*

*Ovom prilikom zahvalio bih se voditelju rada prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću te dr. sc. Ivici Skozritu, stručnom suradniku na projektu, na uloženom trudu i nesebično pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Također bih se zahvalio svojim prijateljima i kolegama na uzajamnoj pomoći i motivaciji tijekom dosadašnjeg trajanja studija.*

*Karlo Seleš*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Seleš** Mat. br.: 0035187551

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza rezidualnih naprezanja u ispušnom kućištu plinske turbine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Residual Stress Analysis in Gas Turbine Exhaust Housing**

Opis zadatka:

Za postojeće konstrukcijsko rješenje u radu je potrebno provesti analizu rezidualnih naprezanja u konstrukciji ispušnog kućišta plinske turbine tvrtke Alstom. Rezidualna naprezanja nastaju uslijed deformiranja unutarnje i vanjske ljuske, prije početka procesa zavarivanja poklopca rebra *linera* pri montaži na konstrukciju ispušnog kućišta turbine. Pritom je potrebno detaljnije analizirati koncentraciju naprezanja na mjestima geometrijskih diskontinuiteta. Za dobivanje optimalne mreže konačnih elemenata primijeniti metodu adaptivnog umrežavanja. Prikazati raspodjelu ekvivalentnih naprezanja i pomaka za svaki slučaj opterećenja te za odabrane slučajeve prikazati konvergenciju pomaka. Za potrebe proračuna upotrijebiti programski paket Abaqus koji se temelji na metodi konačnih elemenata.

Zadatak rada je zadan u okviru projekta pod nazivom *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design* koji se provodi u suradnji Fakulteta i tvrtke Alstom iz Karlovca. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

■

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdenko Tonković

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

**SADRŽAJ:**

SADRŽAJ: .....	I
POPIS SLIKA: .....	III
POPIS TABLICA: .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
Ispušno kućište plinske turbine .....	3
1.1.1. Zaostala naprezanja u ispušnom kućištu .....	4
1.2. Modeliranje i numerička analiza .....	5
2. ISPITIVANJE KONVERGENCIJE ELEMENATA .....	6
2.1. O konačnim elementima .....	6
2.2. Savijanje ploče .....	8
2.2.1. Rezultati .....	10
2.2.1.1. Pomak u smjeru osi z .....	10
2.2.1.2. Raspodjela naprezanja po Von Misesu .....	13
2.2.2. Konvergencija .....	16
3. PREBACIVANJE REZULTATA IZMEĐU ANALIZA .....	17
3.1.1. Analitičko rješenje za opterećenje tlakom .....	18
3.1.2. Numeričko rješenje za opterećenje tlakom .....	19
3.2.1. Analitičko rješenje za opterećenje pomakom .....	24
3.2.2. Numeričko rješenje za ploču opterećenu pomakom .....	26
3.2.3. Zaključak .....	29
4. NUMERIČKA ANALIZA ZAOSTALIH NAPREZANJA ISPUŠNOG KUĆIŠTA PLINSKE TURBINE .....	30
4.1. Svojstva materijala i presjeka .....	31
4.2. Rubni uvjeti simetrije .....	32
4.3. Rubni uvjeti opterećenja .....	33
4.4. Diskretizacija modela .....	35
4.5. Rezultati numeričke analize .....	36
4.5.1. Pomaci u smjeru r .....	36
4.5.2. Ekvivalenta naprezanja .....	40
4.6. Usporedba naprezanja i raspodjele pomaka sa modelom opterećenim kontinuiranim tlakom po vanjskom rubu .....	41
4.7. Razmatranje koncentracije naprezanja u području geometrijskih diskontinuiteta primjenom metode adaptivnog umrežavanja .....	44
4.7.1. Konvergencija ekvivalentnih naprezanja primjenom metode adaptivnog umrežavanja .....	50
5. ZAKLJUČAK .....	51
LITERATURA .....	52

---

PRILOZI.....	53
--------------	----

## POPIS SLIKA:

Slika 1.1.	Plinska turbina GT26 [2] .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 1.2.	<i>liner</i> .....	3
Slika 1.3.	Pukotine u lineru .....	4
Slika 1.4.	Liner i poklopac.....	5
Slika 2.1.	Četverokutni konačni elementi: a) prvog reda - S4R i S4, b) drugog reda - S8R [4] .....	6
Slika 2.2.	Točke integracije za element: a) S4, b) S4R, c) S8R [4].....	7
Slika 2.3.	Uklještena ploča opterećena konstantnim kontinuiranim pomakom u smjeru osi $z$ s naznačenom točkom $A$ .....	8
Slika 2.4.	Prikaz različitih gustoća mreža konačnih elemenata na zadanoj ploči: a) 1 konačni element, b) 25 konačnih elemenata, c) 100 konačnih elemenata, d) 2500 konačnih elemenata.....	9
Slika 2.5.	Raspodjela pomaka u smjeru osi $z$ za gustoće mreža S4 konačnih elemenata: a) 1 element i b) 2500 elemenata.....	10
Slika 2.6.	Raspodjela pomaka u smjeru osi $z$ za gustoće mreža S4R konačnih elemenata: a) 1 element i b) 2500 elemenata.....	11
Slika 2.7.	Raspodjela pomaka u smjeru osi $z$ za gustoće mreža S8R konačnih elemenata: a) 1 element i b) 2500 elemenata.....	12
Slika 2.8.	Polje naprezanja po Von Misesu elementa S4 za gustoću mreže: a) 1 element i b) 2500 elemenata.....	13
Slika 2.9.	Polje naprezanja po Von Misesu elementa S4R za gustoću mreže: a) 1 element .	14
Slika 2.10.	Polje naprezanja po Von Misesu elementa S8R za gustoću mreže: a) 1 element .	15
Slika 2.11.	Konvergencya ljuskastih konačnih četverokutnih elemenata kod savijanja uklještene ploče opterećene pomakom po nasuprotnom rubu .....	16
Slika 3.1.	Ploča 200x200x1 mm opterećena konstantnim tlakom [6] .....	18
Slika 3.2.	Četvrtina ploče opterećene konstantnim tlakom [6].....	20
Slika 3.3.	Diskretizacija četvrtine ploče .....	21
Slika 3.4.	Četvrtina ploče opterećena konstantnim tlakom .....	21
Slika 3.5.	Polje naprezanja S11 u: a) početnom i b) krajnjem trenutku .....	22
Slika 3.6.	Pomak u smjeru osi $x$ u: a) početnom i b) krajnjem trenutku .....	23
Slika 3.7.	Ploča 200x200x1 mm opterećena pomakom [6] .....	24
Slika 3.8.	Četvrtina ploče opterećena pomakom .....	26
Slika 3.9.	Polje naprezanja S11 u: a) početnom i b) krajnjem trenutku .....	27
Slika 3.10.	Pomak u smjeru osi $x$ u: a) početnom i b) krajnjem trenutku .....	28
Slika 4.1.	Preddeformacija lineru [5] .....	30
Slika 4.2.	Numerički model desetine lineru.....	31
Slika 4.3.	Rubni uvjeti simetrije .....	32
Slika 4.4.	Konstantni kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu .....	34
Slika 4.5.	Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan pravicima .....	35
Slika 4.6.	Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan trigonometrijskim funkcijama .....	35
Slika 4.7.	Diskretizirani model desetine lineru.....	36
Slika 4.8.	Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom konstantnim kontinuiranim pomacima na unutarnjem i vanjskom rubu.....	37

Slika 4.9.	Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom lineru za model opterećen konstantnim kontinuiranim pomacima na unutarnjem i vanjskom rubu.....	37
Slika 4.10.	Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim pravcima na unutarnjem i vanjskom rubu.....	38
Slika 4.11.	Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom lineru za model opterećen kontinuiranim pomacima opisanim pravcima na unutarnjem i vanjskom rubu ....	38
Slika 4.12.	Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu .....	39
Slika 4.13.	Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom lineru za model opterećen kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu .....	39
Slika 4.14.	Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu .....	40
Slika 4.15.	Raspodjela pomaka u smjeru osi $r$ na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu .....	42
Slika 4.16.	Raspodjela pomaka u prikazanog na cijelom lineru za model opterećen konstantnim tlakom po vanjskom rubu .....	42
Slika 4.17.	Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu .....	43
Slika 4.18.	Diskretizacija numeričkog modela u prvoj iteraciji .....	44
Slika 4.19.	Polje ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu u prvoj iteraciji.....	45
Slika 4.20.	Diskretizacija numeričkog modela u drugoj iteraciji .....	46
Slika 4.21.	Polje ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu u drugoj iteraciji.....	47
Slika 4.22.	Diskretizacija numeričkog modela u trećoj iteraciji.....	48
Slika 4.23.	Polje ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu u trećoj iteraciji.....	49
Slika 4.24.	Dijagramski prikaz konvergencije ekvivalentnih naprezanja .....	50



**POPIS TABLICA:**

Tablica 1.1.	Karakteristike plinske turbine GT26 [2] .....	2
--------------	---	---

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\delta$	mm	Debljina ploče
$E$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Modul elastičnosti
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$		Komponente deformacije u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$H$	mm	Visina ploče
$L$	mm	Duljina ploče
$\sigma_x, \sigma_y$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Komponente naprezanja u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$\sigma_x^z$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Zaostalo naprezanje u smjeru osi $x$
$p$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Tlak
$r, \vartheta, z$	mm, rad	Cilindrične koordinate
$t$	mm	Debljina ljuske modela
$\varphi_{ix}, \varphi_{iy}, \varphi_{iz}$	rad	Kutovi zakreta oko osi $x, y, z$ $i$ -tog čvora
$u_i, v_i, w_i$	mm	Pomaci u smjeru $x, y, z$ $i$ -tog čvora
$u_r$	mm	Radijalna komponenta pomaka u cilindričnom koordinatnom sustavu
$u_x, u_y$	mm	Komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$UR1, UR2, UR3$	rad	Kutovi zakreta u Kartezijevom koordinatnom sustavu u programskom paketu ABAQUS [3]
$U1, U2, U3$	mm	Pomaci u Kartezijevom koordinatnom sustavu u programskom paketu ABAQUS [3]
$v^T$	mm, rad	Vektor stupnjeva slobode konačnog elementa
$\mathbf{v}_i$	mm, rad	Vektor stupnjeva slobode $i$ -tog čvora elementa
$\nu$		Poissonov faktor
$w$	mm	Vertikalni pomak ploče

## SAŽETAK

Naslov rada: Analiza rezidualnih naprezanja u ispušnom kućištu plinske turbine

Ključne riječi: Metoda konačnih elemenata, zaostala naprezanja, Abaqus, ispušno kućište plinske turbine.

Autor: Karlo Seleš

U ovom završnom radu provedena je numerička analiza zaostalih naprezanja i deformacija ispušnog kućišta plinske turbine, odnosno linera. Prije same numeričke analize, koja je vršena metodom konačnih elemenata u programskom paketu ABAQUS/STANDARD, dan je kratak osvrt o korištenim konačnim elementima te ispitana njihova konvergencija na primjeru ukliještene ploče opterećene vertikalnim pomakom po nasuprotnom rubu. Također, u sklopu uvoda u numeričku analizu, ispitana je opcija prebacivanja rezultata između analiza, korištenim elementima, na jednostavnom primjeru membranskog rastezanja tanke ploče, čiji je analitički postupak također prikazan.

Nakon ispitivanja konvergencije i verifikacije korištenih elemenata, izvršena je numerička analiza na jednoj desetini linera koristeći potrebne uvjete simetrije. Importirana geometrija na kojoj je izvršena analiza, te pomaci izmjereni nakon preddeformacije linera prije zavarivanja koji su korišteni za određivanje amplituda opterećenja, dobiveni su od strane tvrtke Alstom u svrhe izrade završnog rada u okviru projekta pod nazivom Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design*) u suradnji s Fakultetom strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U sklopu numeričke analize ispitano je nekoliko načina zadavanja opterećenja u obliku pomaka po rubu modela, te je za usporedbu izvršena analiza s opterećenjem u obliku kontinuiranog tlaka po istom rubu na način da dobivena raspodjela pomaka bude što sličnija dobivenoj u analizi modela opterećenog pomakom. Za način zadavanja opterećenja u obliku pomaka po rubu modela koji je davao najrealniju raspodjelu pomaka po modelu, detaljnije je analizirana koncentracija naprezanja koja se javljaju u geometrijskim diskontinuitetima te je koristeći se metodom adaptivnog umrežavanja ispitana konvergencija ekvivalentnih naprezanja u tim područjima.

## SUMMARY

Title: Residual Stress Analysis in Gas Turbine Exhaust Housing

Key words: Finite element method, residual stress, Abaqus, Gas Exhaust Housing

Author: Karlo Seleš

In this paper a numerical analysis of residual stress in Gas Turbine Exhaust Housing was conducted. Before the actual numerical analysis, which was performed using finite element method in software package ABAQUS/STANDARD, a brief review on used finite elements is given and their convergence is tested on the example of wedged plate loaded with vertical displacement at the opposite edge. Also, as part of the introduction to numerical analysis, the option of transferring the results between the analyses, with the used finite elements, has been tested on the simple example of membrane stretching of thin plate, whose analytical computing procedure has also been given.

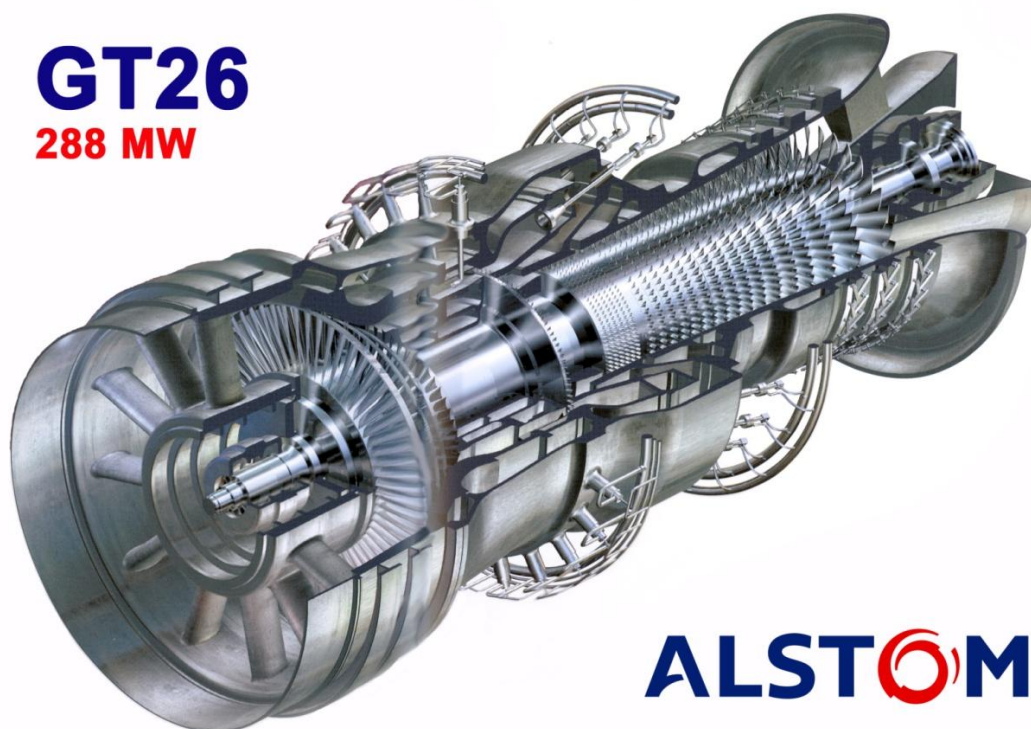
After examination of convergence and verification of the elements used, numerical analysis has been performed on one-tenth of the liner, using necessary symmetry conditions. Imported geometry on which the numerical analysis has been performed, and measured displacements after the pre deformation of liner end radius which were used for determination of load amplitudes were given by Alstom company for composing of this paper in the framework of the project entitled *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design* in collaboration with the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Within the numerical analysis several types of application of loads in the form of model edge displacements has been analyzed. For comparison, the numerical analysis of load applied in the form of model edge pressure has been performed in such a way that the resulting distribution of displacement would be close to the one obtained in the analysis of model with applied load in form of displacement.

For the type of application of the load in the form of displacement along the edge model, which gave the most realistic displacement distribution, the stress concentrations that occur in geometric discontinuities has been analyzed more carefully using the adaptive meshing method.

## 1. UVOD

Plinska turbina je rotacijski stroj koji pretvara energiju izgaranja plinova u koristan rad. Plinske turbine spadaju u motore s unutarnjim izgaranjem. Na ulazu se nalazi kompresor, koji povećava tlak ulaznih plinova smanjujući im obujam. Nakon kompresora slijedi komora za izgaranje, gdje se ulazni plinovi miješaju sa gorivom i zatim pale, čime se unosi energija. U komori za izgaranje, gdje vlada visok tlak, izgaranje goriva stvara visoke temperature. Proizvodi izgaranja prisilno ulaze u turbinu, s velikom brzinom i protokom, gdje se preko mlaznica usmjeruju na lopatice, koje se okreću, a ispušni plinovi izlaze sa smanjenom temperaturom i tlakom. [1]

Slika 1.1 prikazuje plinsku turbinu GT26 tvrtke Alstom, francuske multinacionalne kompanije bazirane na proizvodnji i prijenosu električne energije, proizvodnja turbina za različite vrste elektrana uključujući hidro elektrane, nuklearne elektrane i termoelektrane. Njihov naglasak temelji se na inovativnim i ekološki prihvatljivim tehnologijama za proizvodnju električne energije iz raznih izvora energije, poput vode, plina, ugljena, vjetra.



Slika 1.1. Plinska turbina GT26 [2]

Tvrtka se također bavi željezničkom infrastrukturom, infrastrukturom velikih sustava električnih, solarno-termalnih te geotermalnih mreža.

Jedna od podružnica tvrtke Alstom smještena je u Hrvatskoj, točnije u Karlovcu. Među istaknutim partnerima tvrtke Alstom, nalazi se i Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Suradnjom ovih dviju strana izmjenjuje se iskustvo i znanje u rješavanju inženjerskih problema, pa se tako i ovaj rad temelji na tekućem projektu Razvoj i poboljšanje ispušnog sustava plinskih turbina (eng. *Gas Turbine Exhaust System Enhanced Design*). [2]

U tablici 1.1 prikazane su karakteristike plinske turbine GT26.

**Tablica 1.1. Karakteristike plinske turbine GT26 [2]**

Plinska turbina GT26	
Radna tvar	Prirodni plin
Frekvencija	50 Hz
Okretna brzina	3000 o/min
Izlazna snaga el. Energije	345,0 MW
Učinkovitost	41%
Količina topline	8780 kJ/kWh
Emisija ispušnih plinova	715 kg/s
Temperatura ispušnih plinova	616°C
Težina	406 t
Dimenzije (d x š x v)	12,0 x 4,9 x 5 m

### 1.1. Ispušno kućište plinske turbine

Ispušno kućište, u grubo, sastoji se od nosive konstrukcije, izolacije te tzv. *linera*. *Liner*, prikazan na slici 1.2, sastoji se od dvije cilindrične ljuske između kojih se zavaruju rebra. Između rebra struje ispušni plinovi temperaturom  $616^{\circ}\text{C}$  i protokom  $715\text{ kg/s}$ , kako je prikazano u tablici 1.1.



Slika 1.2. *Liner*

Donedavno se nije toliko pažnje obraćalo na ispušno kućište, no kako su radni uvjeti turbine podignuti, te se sve više uvodi isprekidani ciklus rada zbog raznih razloga (npr. zbog zamjene solarnom energijom preko dana) počele su se pojavljivati pukotine, slične pukotinama na slici 1.3.



**Slika 1.3. Pukotine u lineru [8]**

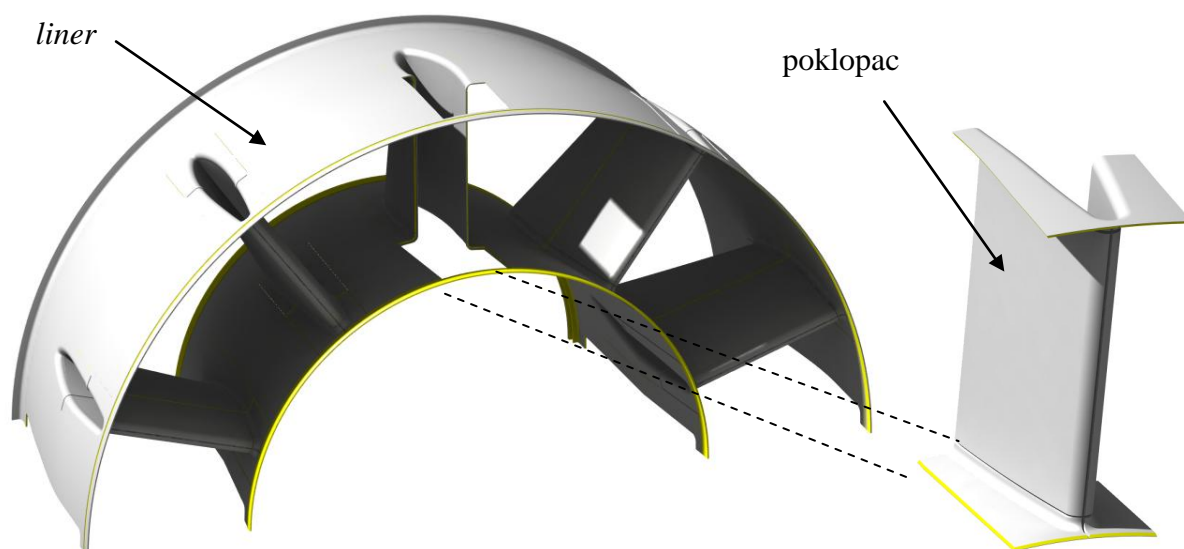
Jedan od mogućih uzroka pojave navedenih pukotina su zaostala naprezanja koja se javljaju prilikom deformiranja kućišta prije zavarivanja, pa je to glavna tema ovog završnog rada.

#### ***1.1.1. Zaostala naprezanja u ispušnom kućištu***

Kako je u grubo navedeno u poglavlju 1.1, postupak izrade je takav da se dio rebra zavari za unutarnju i vanjsku ljusku, te se provede toplinska obrada za smanjenje zaostalih naprezanja. Nakon toga se taj dio *linera* montira na nosivu konstrukciju, uz pripasivanje tj. deformiranje da se postigne što bolje poklapanje tj. lakše zavarivanje, te cilindričnost unutarnje i vanjske ljuske, što je prikazano u poglavlju 4. Na kraju dolazi zavarivanje tzv. poklopaca, te je konstrukcija završena. Na slici 1.4 prikazani su *liner* i poklopac zasebno.

Sumnja se da bi upravo ta deformacija ljusaka zbog lakšeg zavarivanja i postizanja cilindričnosti mogla zajedno s naprežanjem uslijed zavarivanja uzrokovati zaostala naprezanja koja kasnije, u spoju s radnim naprežanjima, uzrokuju pukotine.





Slika 1.4. *Liner i poklopac*

## 1.2. Modeliranje i numerička analiza

Analiza će se vršiti na 1/10 *linera* što je moguće zbog uvjeta simetrije koji vladaju, te će opterećenje biti zadano pomakom kako bi dobili zaostala naprezanja prilikom deformiranja.

Računalna simulacija opterećenja kućišta plinske turbine GT26 provedeno je u programskom paketu *Abaqus* [3] koji se bazira na metodi konačnih elemenata. *Abaqus* se primjenjuje pri računalnom rješavanju inženjerskih problema poput toplinskih naprezanja, analize pomaka i deformacija.

Sastoji se od dva osnovna proizvoda: *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit*. *Abaqus/Standard* služi za analizu opće namjene linearnih i nelinearnih problema i korišten je za izradu ovog rada.

U programskom paketu *Abaqus* nalaze se razni tipovi elemenata čija svojstva je potrebno poznavati kako bi se pravilno odabrala mreža konačnih elemenata koja će u što kraćem vremenu dati što točnija rješenja. [7]

## 2. ISPITIVANJE KONVERGENCIJE ELEMENATA

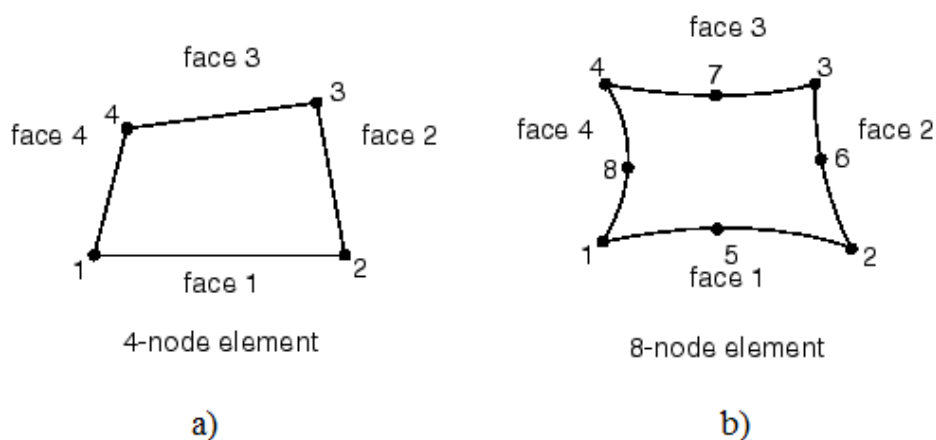
Da bi ispitali konvergenciju konačnih elemenata koji će se koristiti u numeričkoj analizi zaostalih naprezanja, koristit ćemo tanku ploču ukliještenu s jedne strane, te opterećenu na savijanje konstantnim kontinuiranim pomakom s druge strane.

Elementi koji će se ispitati su ljuskasti četverokutni konačni elementi čije su oznake u programskom paketu *Abaqus* kako slijedi S4, S4R i S8R. [3]

### 2.1. O konačnim elementima

Navedeni elementi, S4, S4R i S8R su ljuskasti konačni elementi opće namjene koji se koriste za računanje tankih i debelih ljusaka. Kod njih je korištena mješovita formulacija konačnih elemenata što znači da su u obzir uzete i Kirchhoff-Loveova i Reissner-Mindlinova formulacija ljusaka, gdje deblje ljuske koriste pretežito Reissner-Mindlinovu formulaciju dok tanje ljuske koriste pretežito Kirchhoff-Loveovu formulaciju. Elementi su izvedeni superpozicijom dvodimenzijskih membranskih elemenata i elemenata za rješavanje problema savijanja ploča. [4]

Elementi S4 i S4R su četverokutni ljuskasti elementi prvog reda koji imaju 4 čvora, po jedan na svakom vrhu, dok je element S8R četverokutni ljuskasti element drugog reda s 8 čvorova raspoređenih po stranicama elementa. Na slici 2.1 su prikazani konačni elementi S4, S4R i S8R s pripadajućom raspodjelom čvorova.



**Slika 2.1. Četverokutni konačni elementi: a) prvog reda - S4R i S4, b) drugog reda - S8R [4]**

U svakom čvoru navedenih konačnih elemenata nalazi se 6 stupnjeva slobode (tri translacije i tri rotacije):

$$\mathbf{v}_i^T = [u_i \ v_i \ w_i \ \varphi_{ix} \ \varphi_{iy} \ \varphi_{iz}], \quad (2.1)$$

gdje je  $i$  za elemente prvog reda  $i=1,2,3,4$ , a za elemente drugog reda  $i=1,2,3,4,5,6,7,8$ .

Vektor stupnjeva slobode za elemente prvog reda:

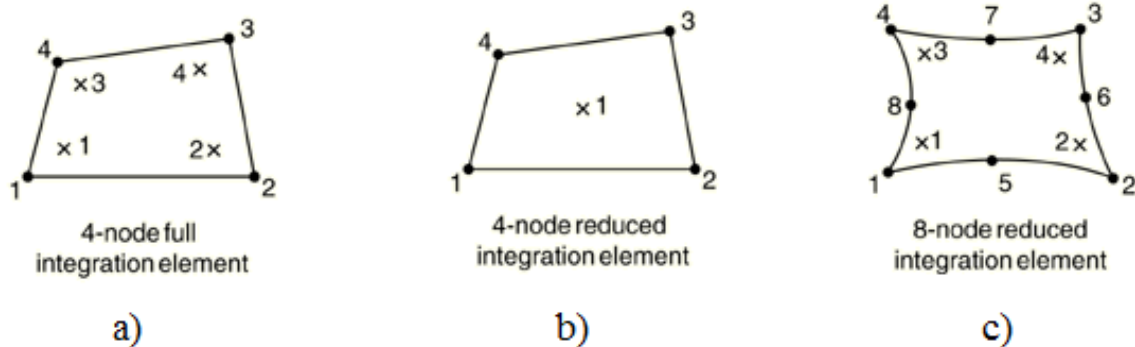
$$\mathbf{v}^T = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3 \ \mathbf{v}_4]. \quad (2.2)$$

Vektor stupnjeva slobode za element drugog reda:

$$\mathbf{v}^T = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3 \ \mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_5 \ \mathbf{v}_6 \ \mathbf{v}_7 \ \mathbf{v}_8]. \quad (2.3)$$

Nadalje, slovo R u oznaci elementa predstavlja tzv. reduciranu integraciju (eng. *reduced integration*). Reduciranom integracijom se smanjuje vrijeme računanja uz uvođenje male greške smanjenjem broja točaka integracije.

Na slici 2.2 je prikazana raspodjela točaka integracije kod razmatranih konačnih elemenata.

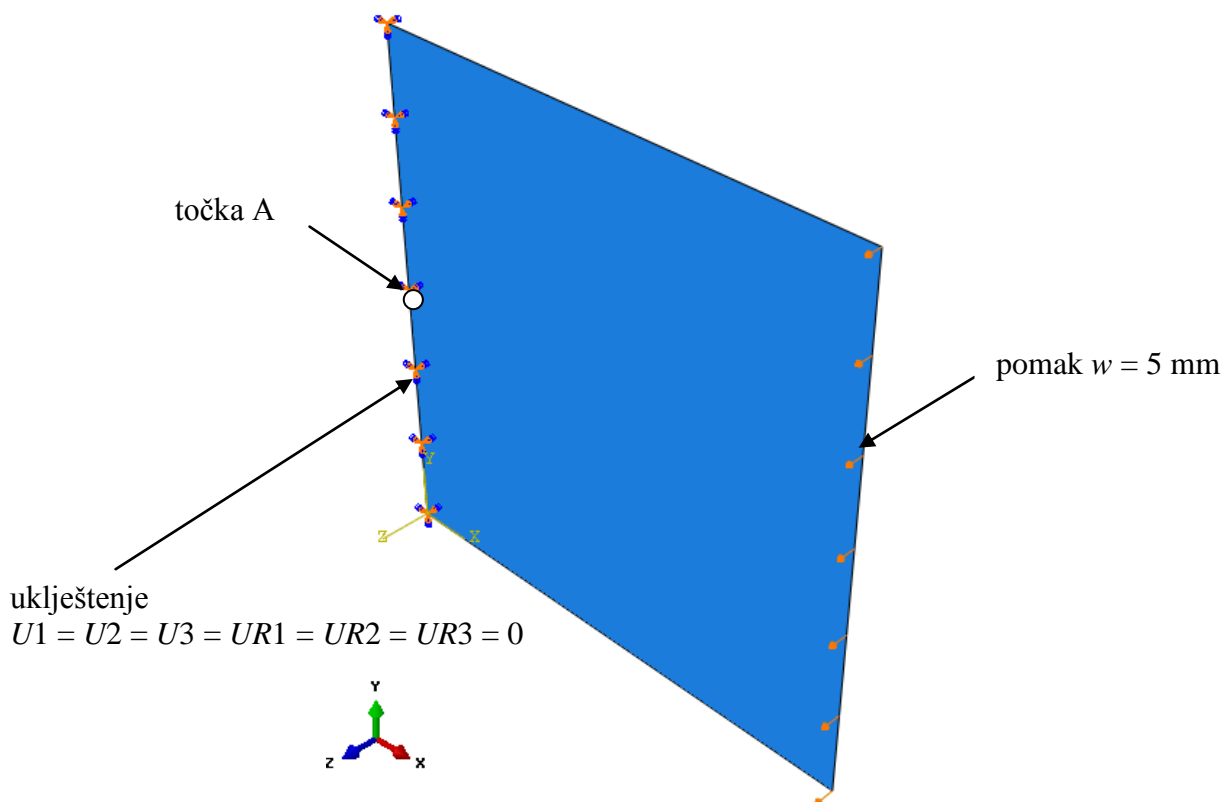


Slika 2.2. Točke integracije za element: a) S4, b) S4R, c) S8R [4]

## 2.2. Savijanje ploče

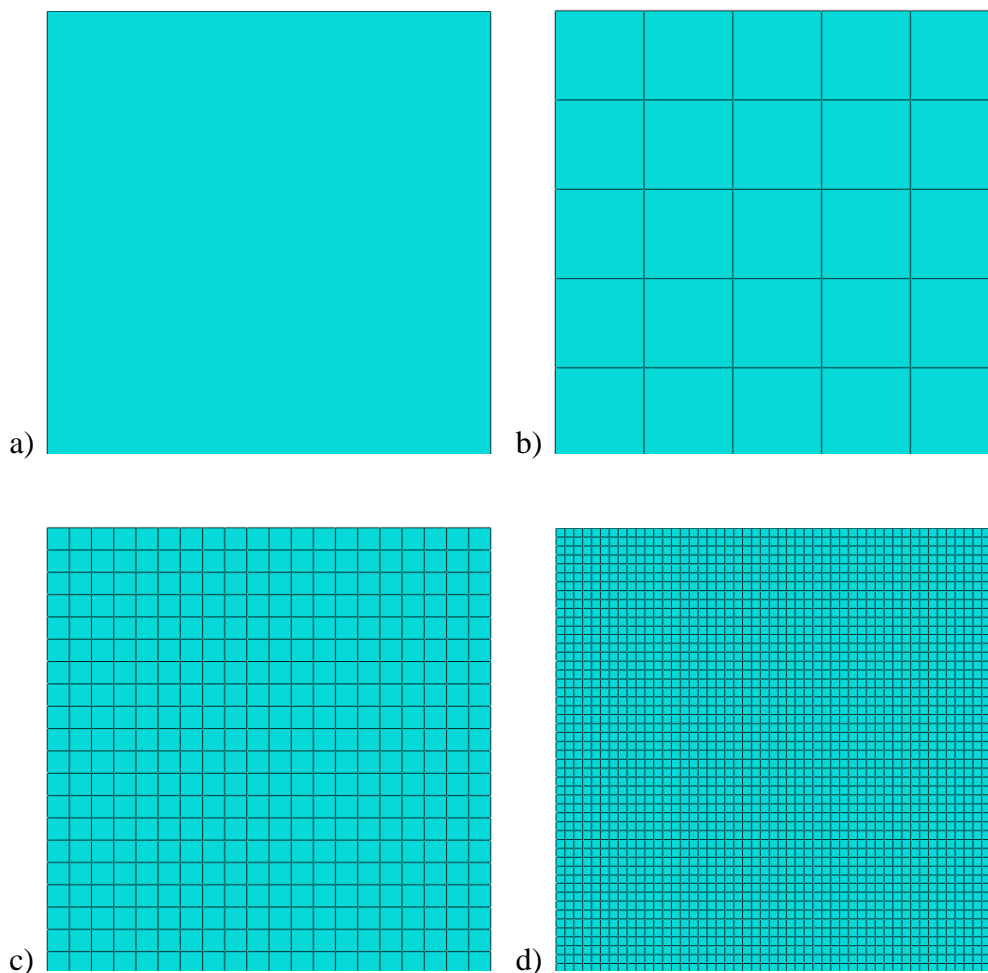
Zbog načina opterećivanja modela na kojem će se vršiti analiza zaostalih naprezanja uslijed deformiranja, izabran je problem savijanja ploče pomakom po rubu kako bi problem na kojem će biti ispitivana konvergencija elemenata bio što sličniji stvarnom problemu.

Tanka ploča dimenzija 200 mm x 200 mm x 1 mm, modula elastičnosti  $E = 200$  GPa, Poissonovog faktora  $\nu = 0,3$ , zadana i opterećena prema slici Slika 2.3, ukliještena je po jednom rubu, te opterećena u smjeru osi  $z$  konstantnim kontinuiranim pomakom  $w = 5$  mm na nasuprotnom rubu.



**Slika 2.3. Ukliještena ploča opterećena konstantnim kontinuiranim pomakom u smjeru osi  $z$  s naznačenom točkom A**

Za razmatranje ovog problema korištena su 3 različita tipa ljuskastih konačnih elementa (S4, S4R i S8R). Analize su provedene na 4 različite gustoće mreže konačnih elemenata prikazanih na slici 2.4.



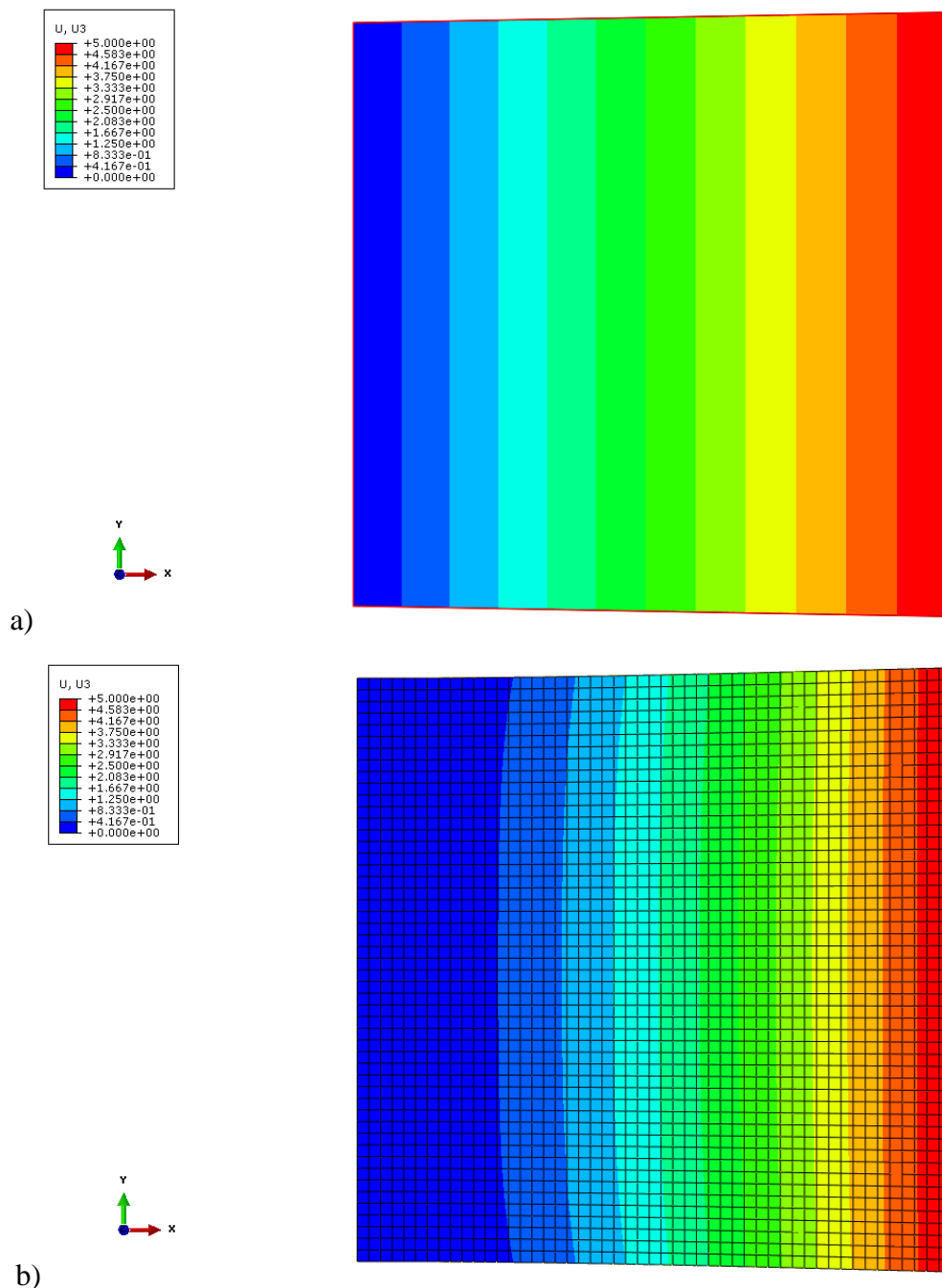
**Slika 2.4. Prikaz različitih gustoća mreža konačnih elemenata na zadanoj ploči:**  
a) 1 konačni element, b) 25 konačnih elemenata, c) 100 konačnih elemenata,  
d) 2500 konačnih elemenata

## 2.2.1. Rezultati

Rezultati su prikazani za gustoće mreža od jednog i 2500 elemenata (slika 2.4 a) i d)).

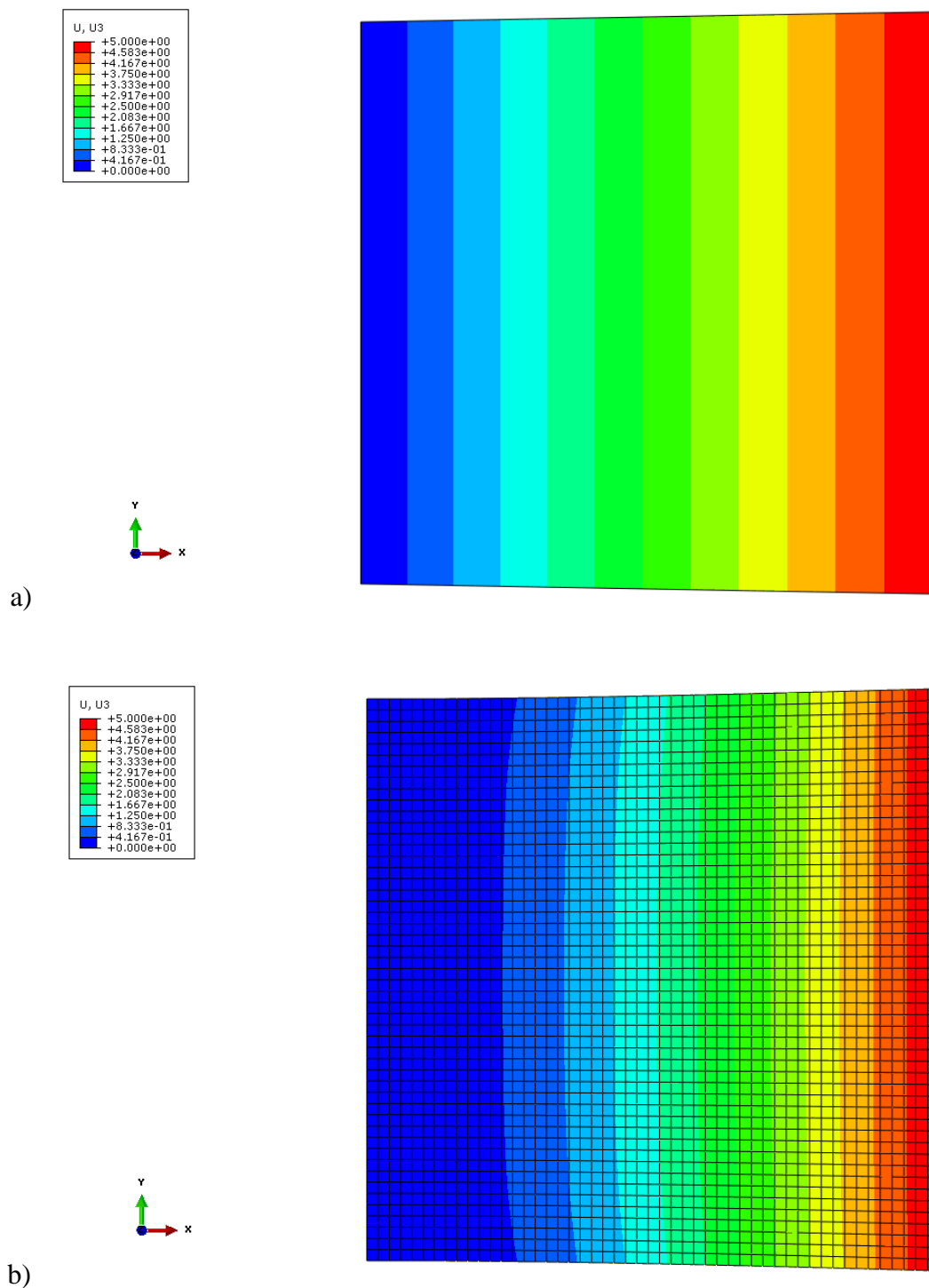
### 2.2.1.1. Pomak u smjeru osi $z$

Na slici 2.5 prikazana je raspodjela pomaka ploče u smjeru osi  $z$ ,  $U_3$ , na deformiranom modelu diskretiziranom sa S4 konačnim elementima.



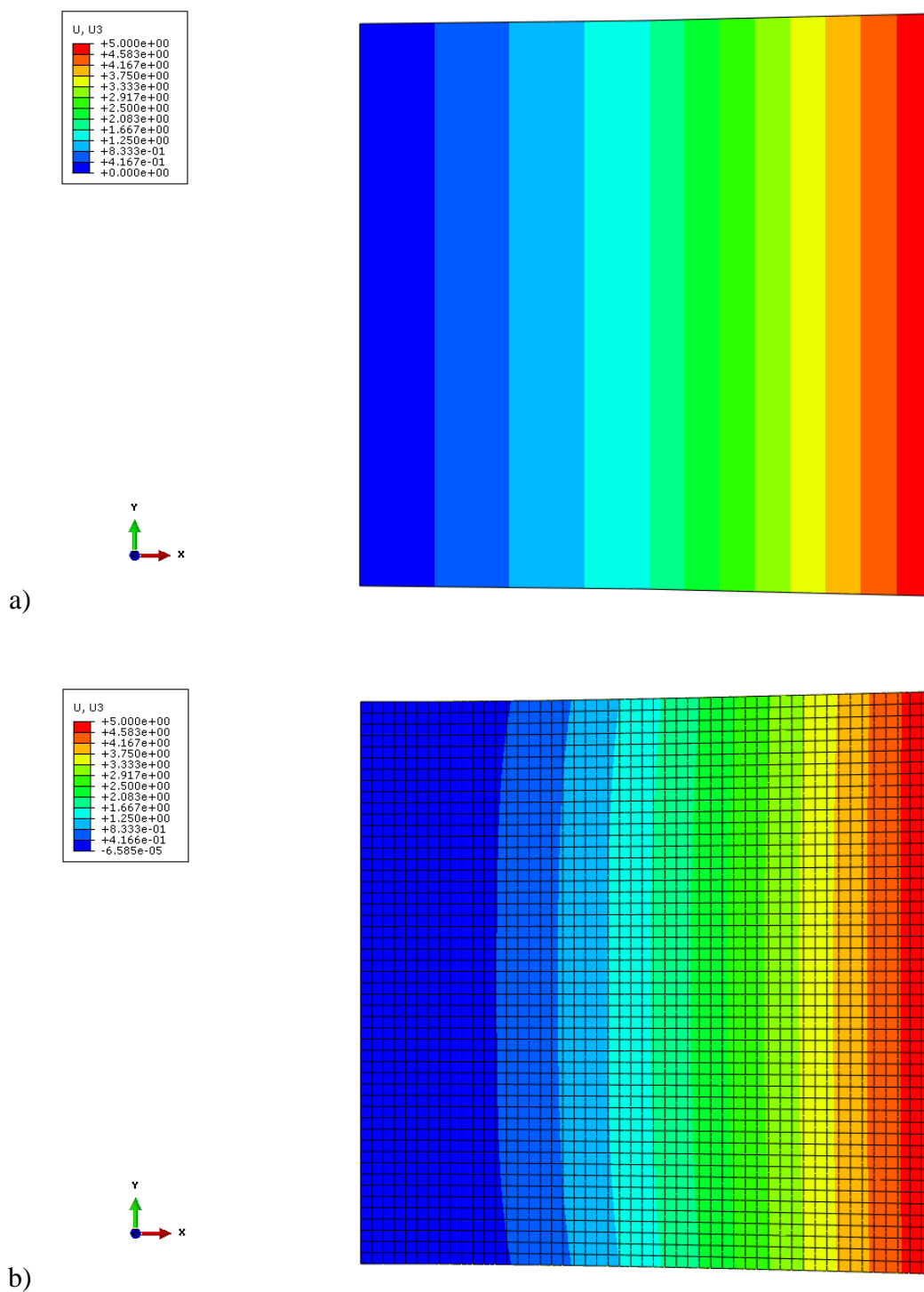
**Slika 2.5. Raspodjela pomaka u smjeru osi  $z$  za gustoće mreža S4 konačnih elemenata:**  
a) 1 element i b) 2500 elemenata

Slika 2.6 prikazuje raspodjelu pomaka ploče, u smjeru osi  $z$ ,  $U_3$ , na deformiranom modelu diskretiziranom sa S4R konačnim elementima.



**Slika 2.6. Raspodjela pomaka u smjeru osi  $z$  za gustoće mreža S4R konačnih elemenata:  
a) 1 element i b) 2500 elemenata**

Na slici 2.7 prikazana je raspodjela pomaka ploče  $U_3$  u smjeru osi  $z$ , na deformiranom modelu diskretiziranom sa S8R konačnim elementima.

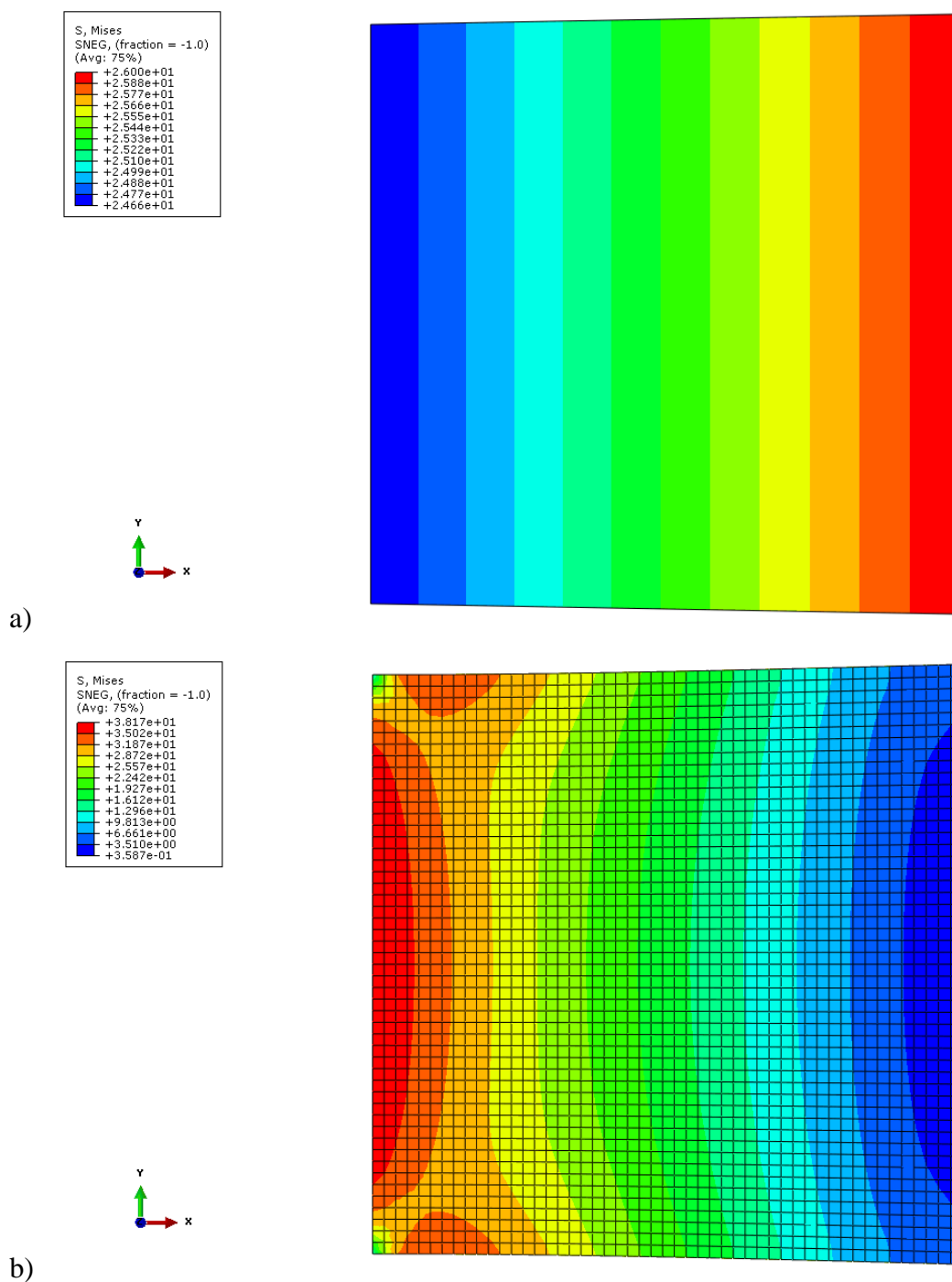


**Slika 2.7. Raspodjela pomaka u smjeru osi  $z$  za gustoće mreža S8R konačnih elemenata:  
a) 1 element i b) 2500 elemenata**



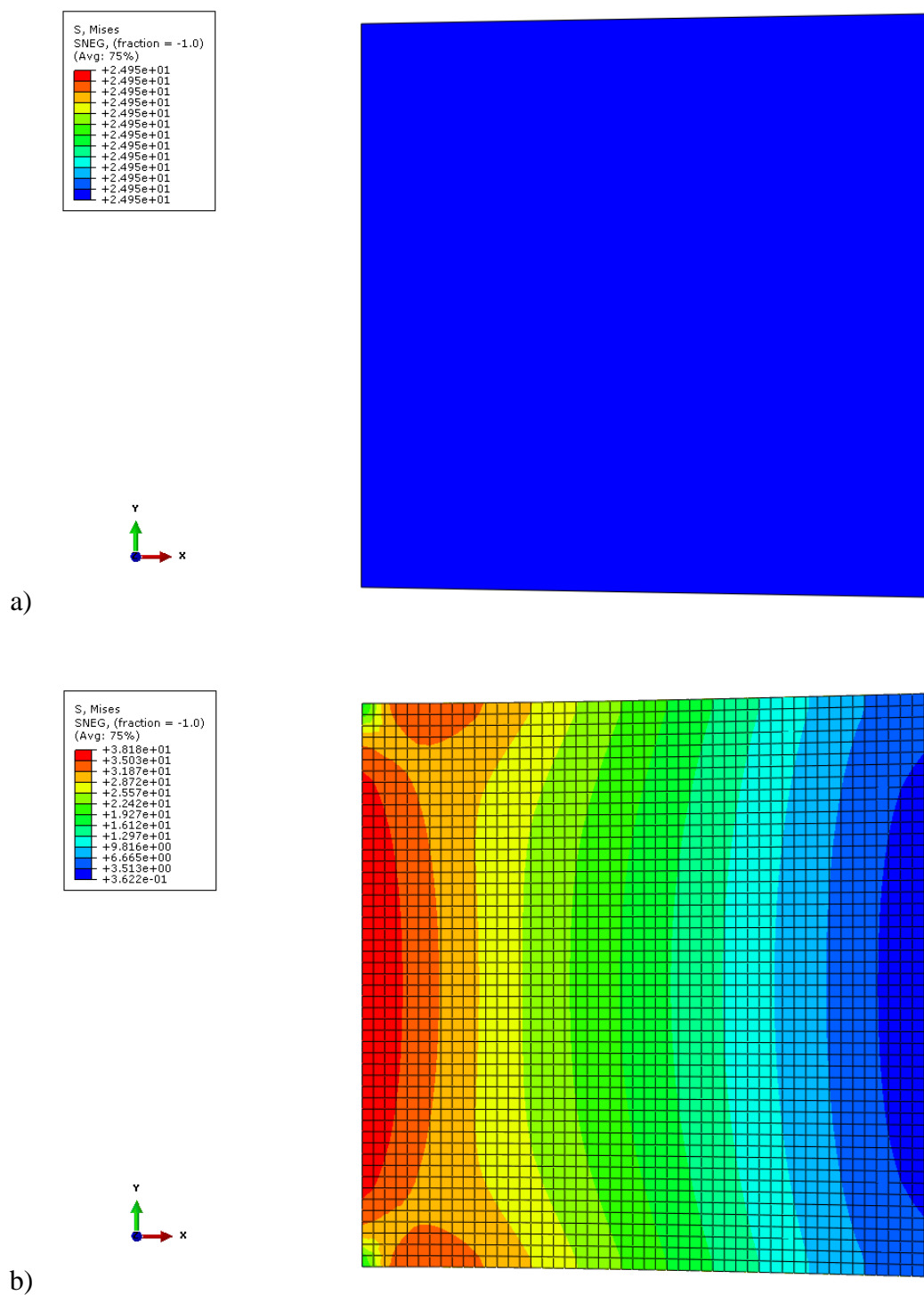
### 2.2.1.2. Raspodjela naprezanja po Von Misesu

Na slici 2.8 je dan prikaz raspodjele naprezanja po Von Misesu, na deformiranom modelu diskretiziranom sa S4 konačnim elementima.



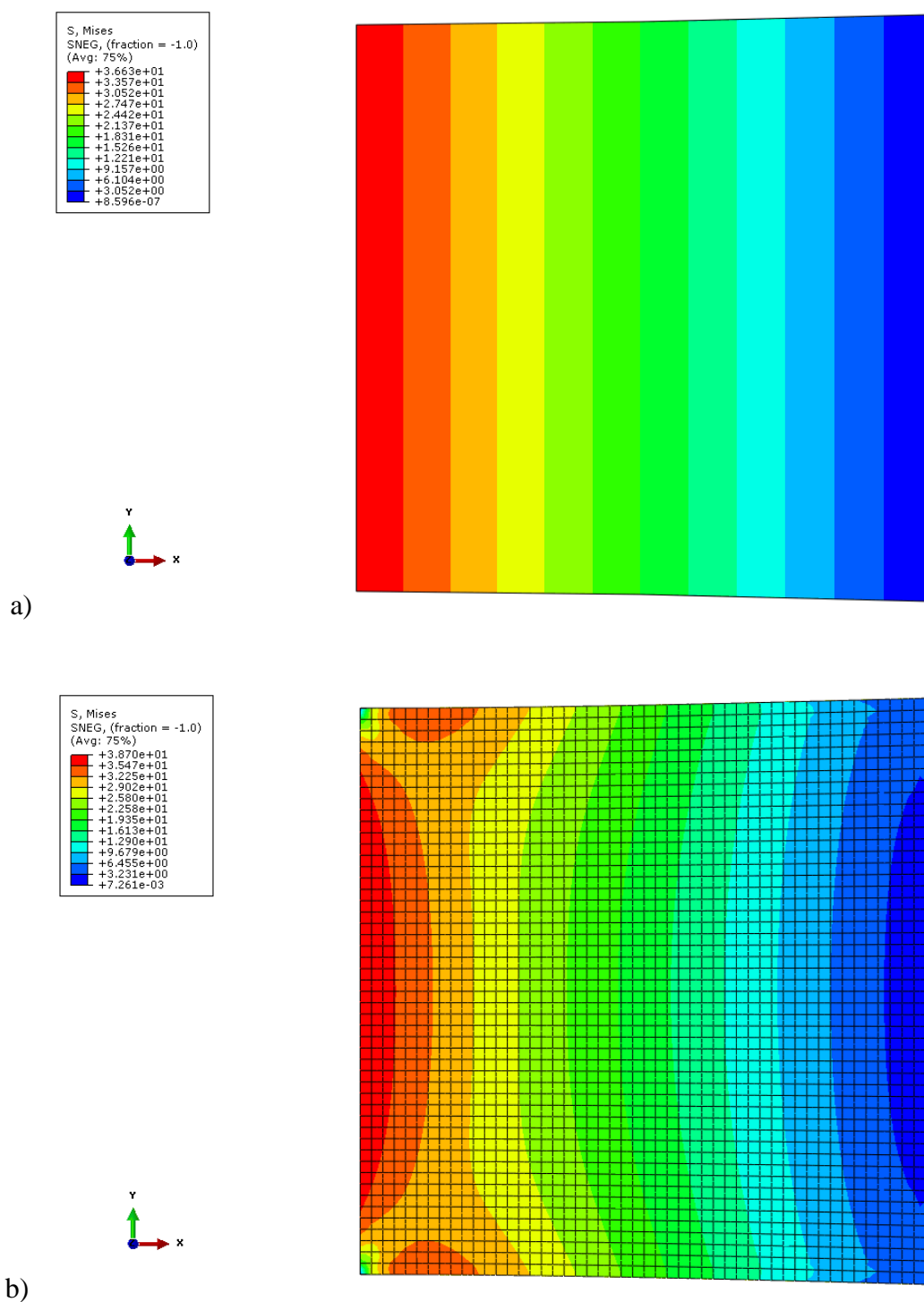
**Slika 2.8. Polje naprezanja po Von Misesu elementa S4 za gustoću mreže:  
a) 1 element i b) 2500 elemenata**

Na slici 2.9 prikazana je raspodjela naprezanja po Von Misesu, na deformiranom modelu diskretiziranom sa S4R konačnim elementima.



**Slika 2.9. Polje naprezanja po Von Misesu elementa S4R za gustoću mreže: a) 1 element  
i b) 2500 elemenata**

Slika 2.10 prikazuje raspodjelu naprezanja po Von Misesu, na deformiranom modelu diskretiziranom sa S8R konačnim elementima.

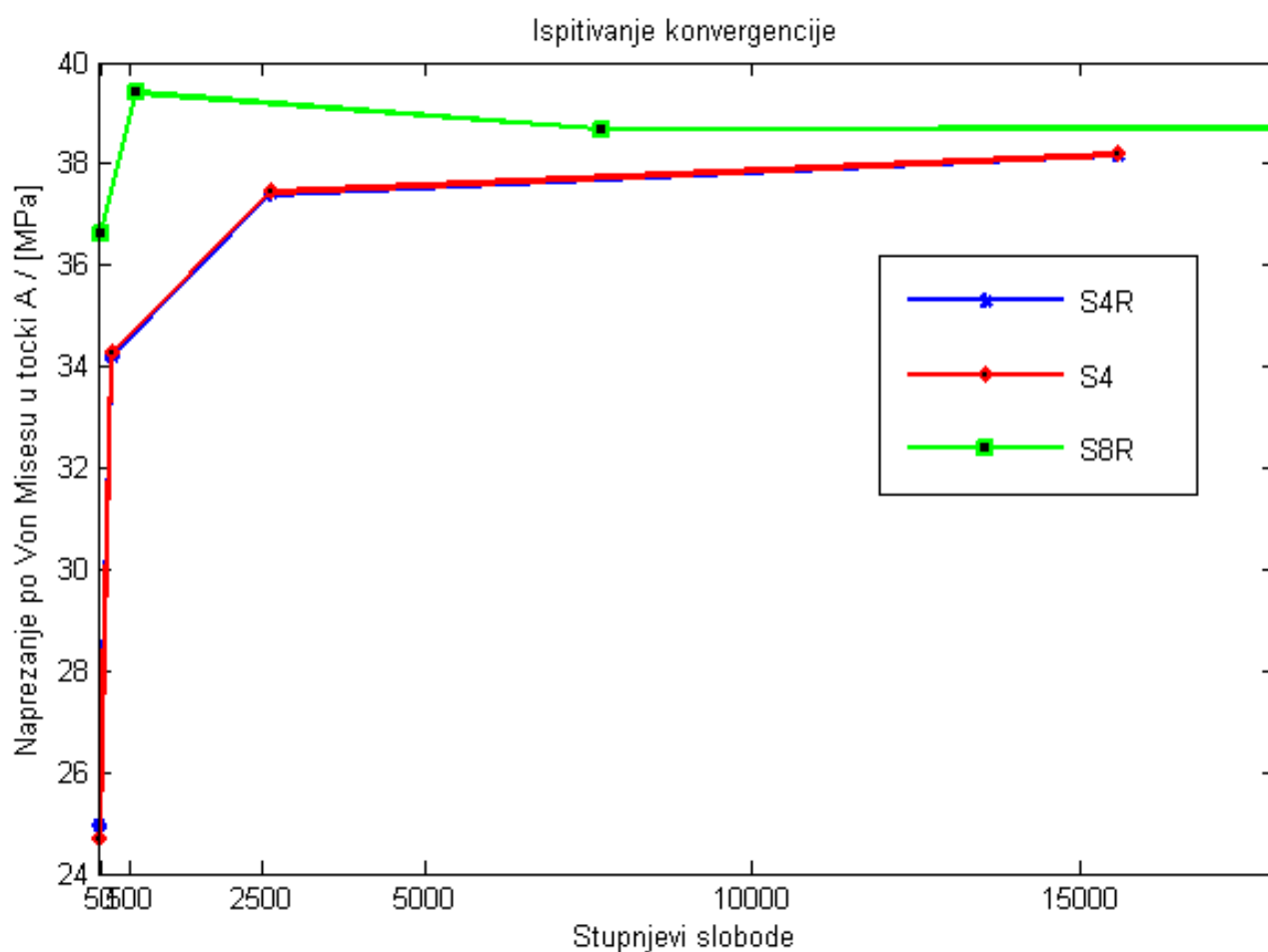


Slika 2.10. Polje naprezanja po Von Misesu elementa S8R za gustoću mreže: a) 1 element  
i b) 2500 elemenata

### 2.2.2. Konvergencija

Na slici 2.11 prikazan je dijagram promjene naprezanja po Von Misesu točke A (slika 2.3.) prema broju stupnjeva slobode numeričkog modela. Iz prikazanog dijagrama se vidi da elementi konvergiraju unatoč činjenici da je pomak zadan po liniji što je fizikalno teško izvedivo, odnosno uvijek bi postojala mala površina, pa zato treba veći broj stupnjeva slobode da bi se postigla konvergencija.

Također je vidljivo da je razlika između elemenata S4 i S4R neznatna, iako je za S4 potrebno vrijeme računanja znatno veće u odnosu na vrijeme računanja potrebno za element S4R pa se taj element sigurno neće koristiti u daljnjoj analizi.



**Slika 2.11. Konvergencija ljuskastih konačnih četverokutnih elemenata kod savijanja ukliještene ploče opterećene pomakom po nasuprotnom rubu**

### 3. PREBACIVANJE REZULTATA IZMEĐU ANALIZA

Da bi analiza zaostalih naprezanja u ispušnom kućištu plinske turbine bila direktno korisna za daljnje analize utjecaja opterećenja koja će već biti nametnuta, potrebno je pronaći način kako prebaciti rezultate dobivene jednom analizom u novu analizu. U ovom slučaju rezultate dobivene prvom analizom smatrat ćemo zaostalim naprezanjima koja se javljaju na početku druge, nove analize.

Za verifikaciju načina prebacivanja rezultata korištena je ploča dimenzija 200x200x1 mm opterećena na nekoliko različitih načina:

1. Ploča prednapregnuta konstantnim zaostalim naprezanjima od 100 MPa u smjeru osi  $x$  te opterećena tlakom 50 MPa s lijeve i desne strane.
2. Ploča prednapregnuta konstantnim zaostalim naprezanjima od 100 MPa u smjeru osi  $x$  te opterećena pomakom 0,025 mm s lijeve i desne strane.

### 3.1.1. Analitičko rješenje za opterećenje tlakom

Zadani podaci:

$H = L = 200 \text{ mm}$  - duljina, tj. visina ploče

$\delta = 1 \text{ mm}$  - debljina ploče

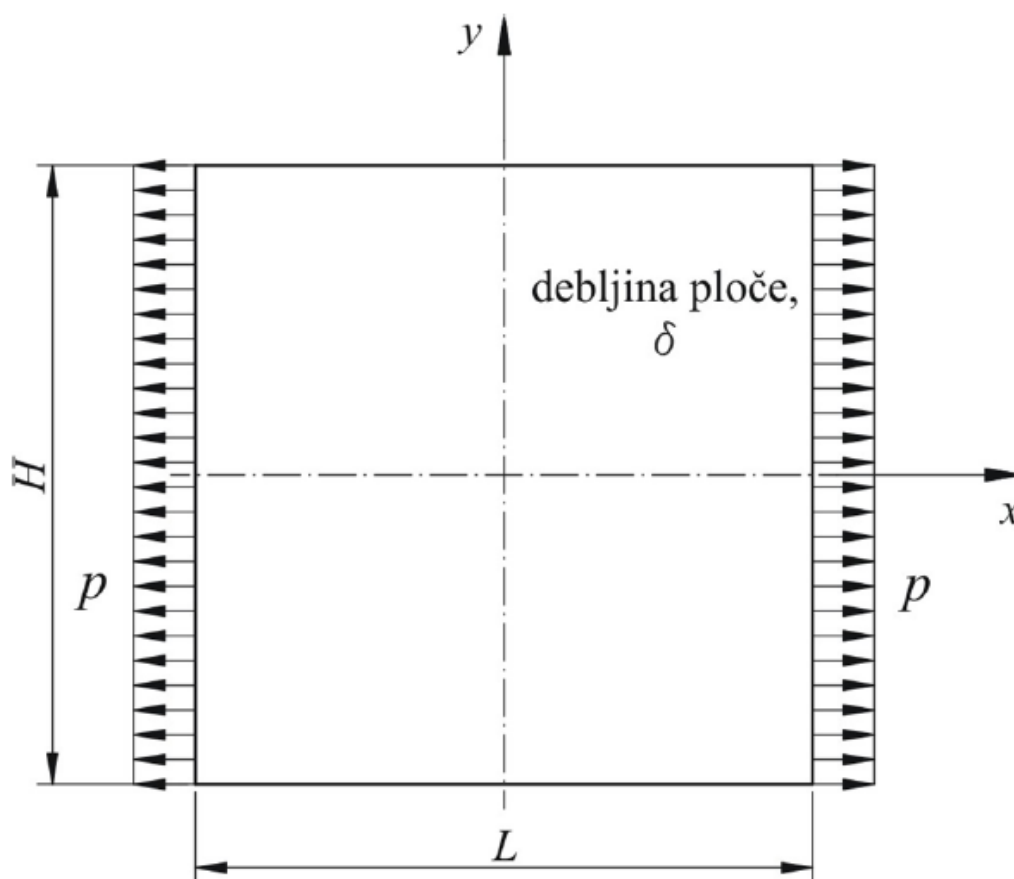
$\nu = 0.3$  - Poissonov faktor

$E = 200 \text{ GPa}$  - modul elastičnosti

$\sigma_x^z = 100 \text{ MPa}$  - zaostalo naprezanje (2.1)

$p = 50 \text{ MPa}$  - zadano naprezanje, tlak (2.2)

Na slici 3.1 prikazana je ploča zadanih dimenzija opterećena tlakom  $p = 50 \text{ MPa}$



Slika 3.1. Ploča 200x200x1 mm opterećena konstantnim tlakom [6]

Ukupno normalno naprezanje u smjeru osi x:

$$\sigma_x = 50\text{MPa} + \sigma_x^z = 150\text{MPa}. \quad (2.3)$$

Ukupno normalno naprezanje u smjeru osi y:

$$\sigma_y = 0. \quad (2.4)$$

Relativna deformacija u smjeru osi x:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{50}{200000} = 0,00025. \quad (2.5)$$

Relativna deformacija u smjeru osi y:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) = -\frac{\nu\sigma_x}{E} = -\frac{0,3 \cdot 50}{200000} = -0,000075. \quad (2.6)$$

Relativni pomak u smjeru osi x:

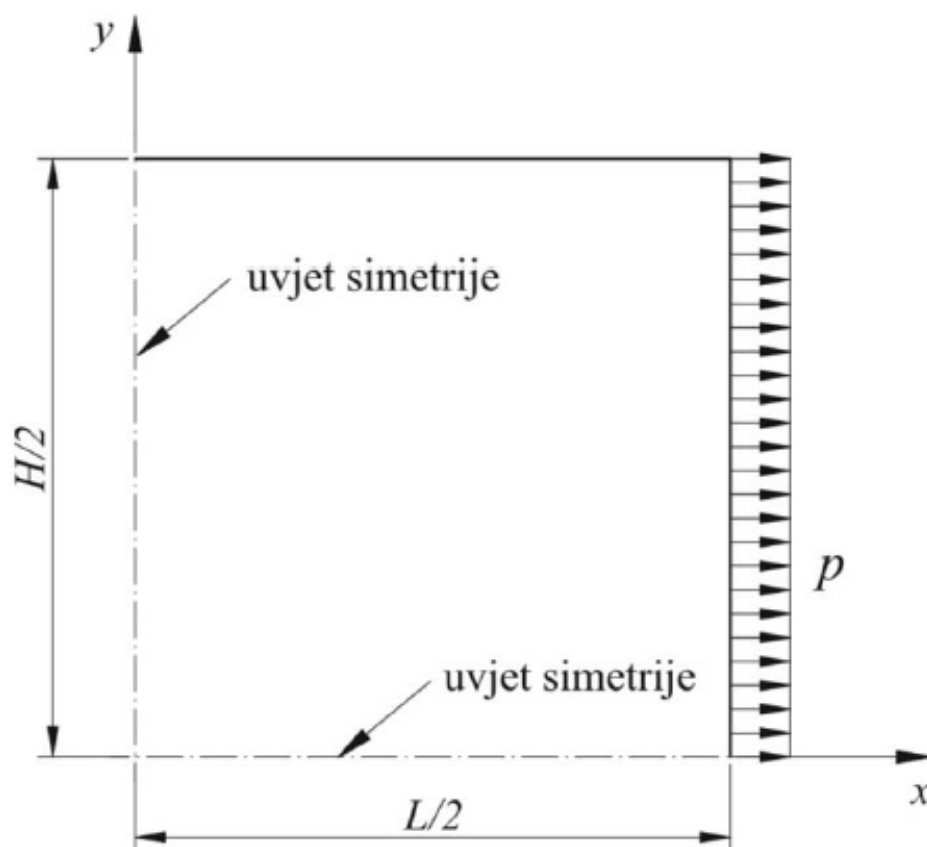
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta L}{2}}{\frac{L}{2}} = \frac{u_x}{\frac{L}{2}} \Rightarrow u_x = \varepsilon_x \cdot \frac{L}{2} = 0,025\text{mm}. \quad (2.7)$$

Relativni pomak u smjeru osi y:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta H}{2}}{\frac{H}{2}} = \frac{u_y}{\frac{H}{2}} \Rightarrow u_y = \varepsilon_y \cdot \frac{H}{2} = -0,0075\text{mm}. \quad (2.8)$$

### 3.1.2. Numeričko rješenje za opterećenje tlakom

U numeričkom rješavanju pomoću programskog paketa *Abaqus* koristeći uvjete simetrije, uzeta je četvrtina ploče, prikazana na slici 3.2. U prvoj analizi ploča je opterećena tlakom  $p^z = 100\text{ MPa}$ , dok je u drugoj opterećena tlakom  $p = 50\text{ MPa}$  uz povlačenje rezultata iz prve analize zadanih u *Predefined Field - Initial State* [3] što je opcija u *Abaqusu* za zadavanje početnog stanja modela.

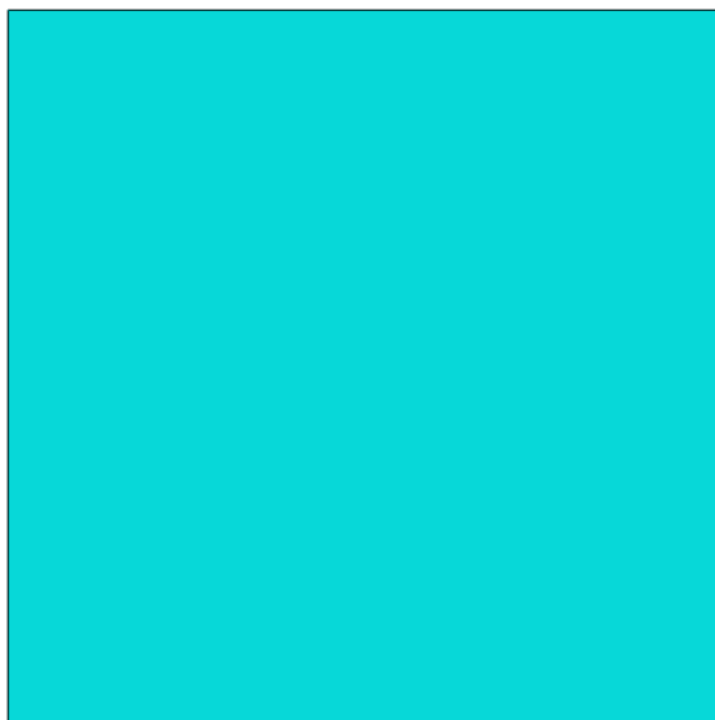


Slika 3.2. Četvrtina ploče opterećene konstantnim tlakom [6]

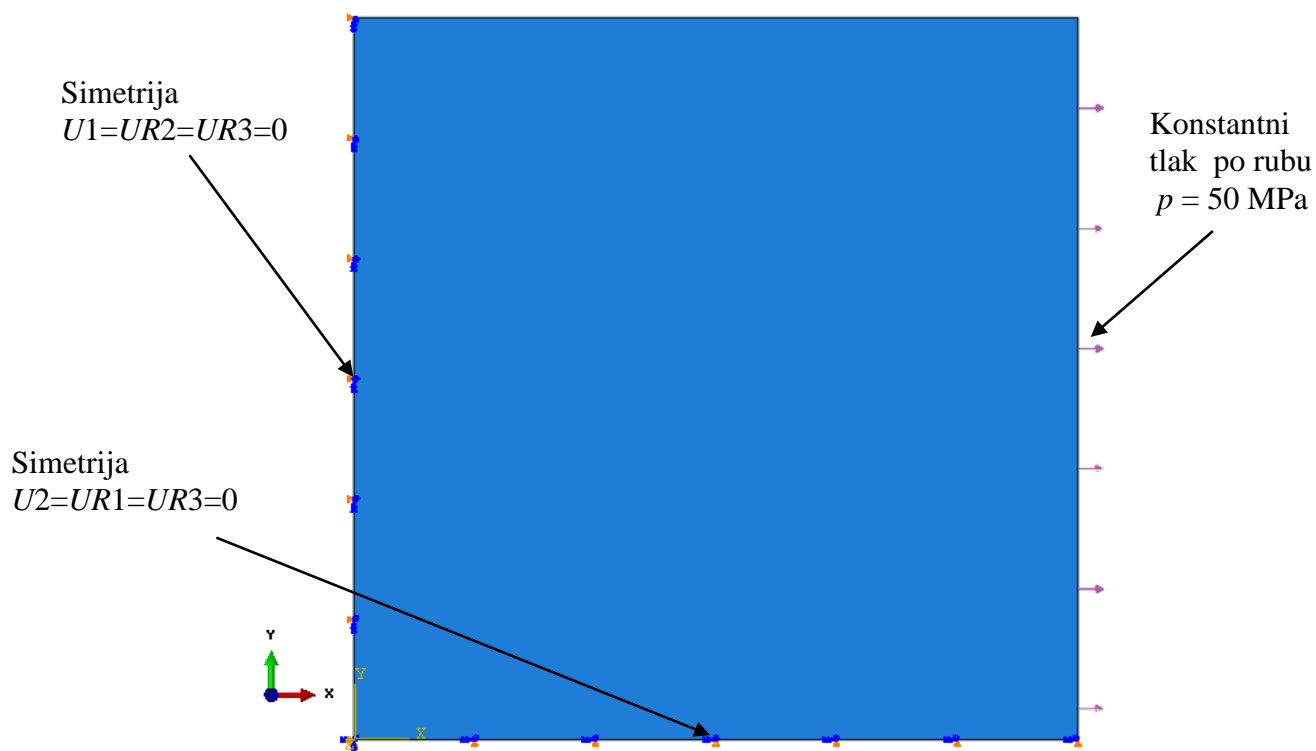
Početni trenutak smatrat će se trenutak u kojem djeluje zaostalo naprezanje i u kojem još nije počelo djelovati opterećenje, dok se krajnji trenutak smatra konačni trenutak u kojem djeluju sva zadana opterećenja.

Četvrtina ploče opisana je jednim S4R konačnim ljuskastim elementom u obje analize. S4R konačni elementi su opisani u poglavlju 2.1. Diskretizacija četvrtine ploče prikazana je na slici 3.3.

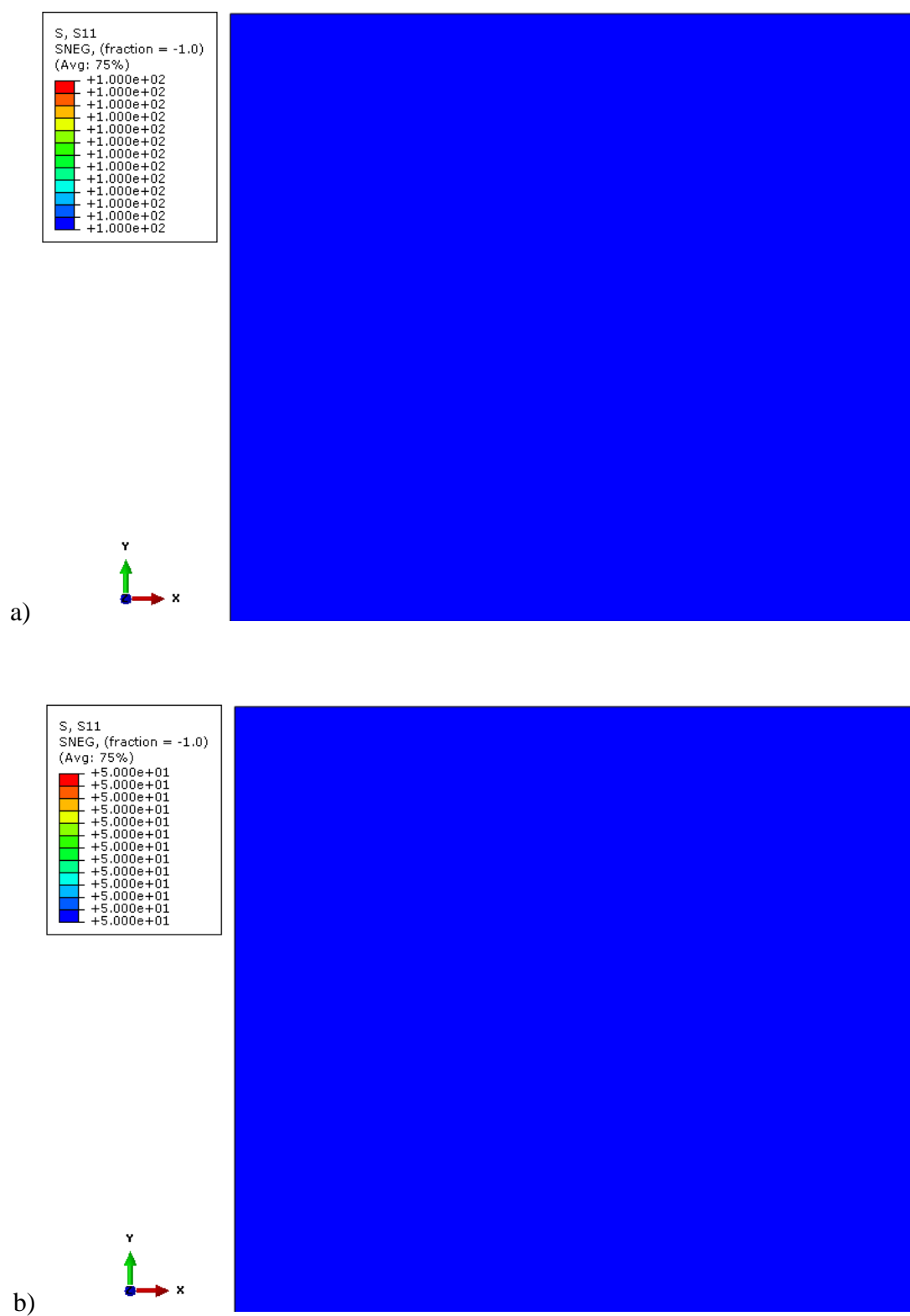


**Slika 3.3. Diskretizacija četvrtine ploče**

Na slici 3.4 prikazana je četvrtina ploče sa zadanim uvjetima simetrije te opterećena konstantnim tlakom po rubu.

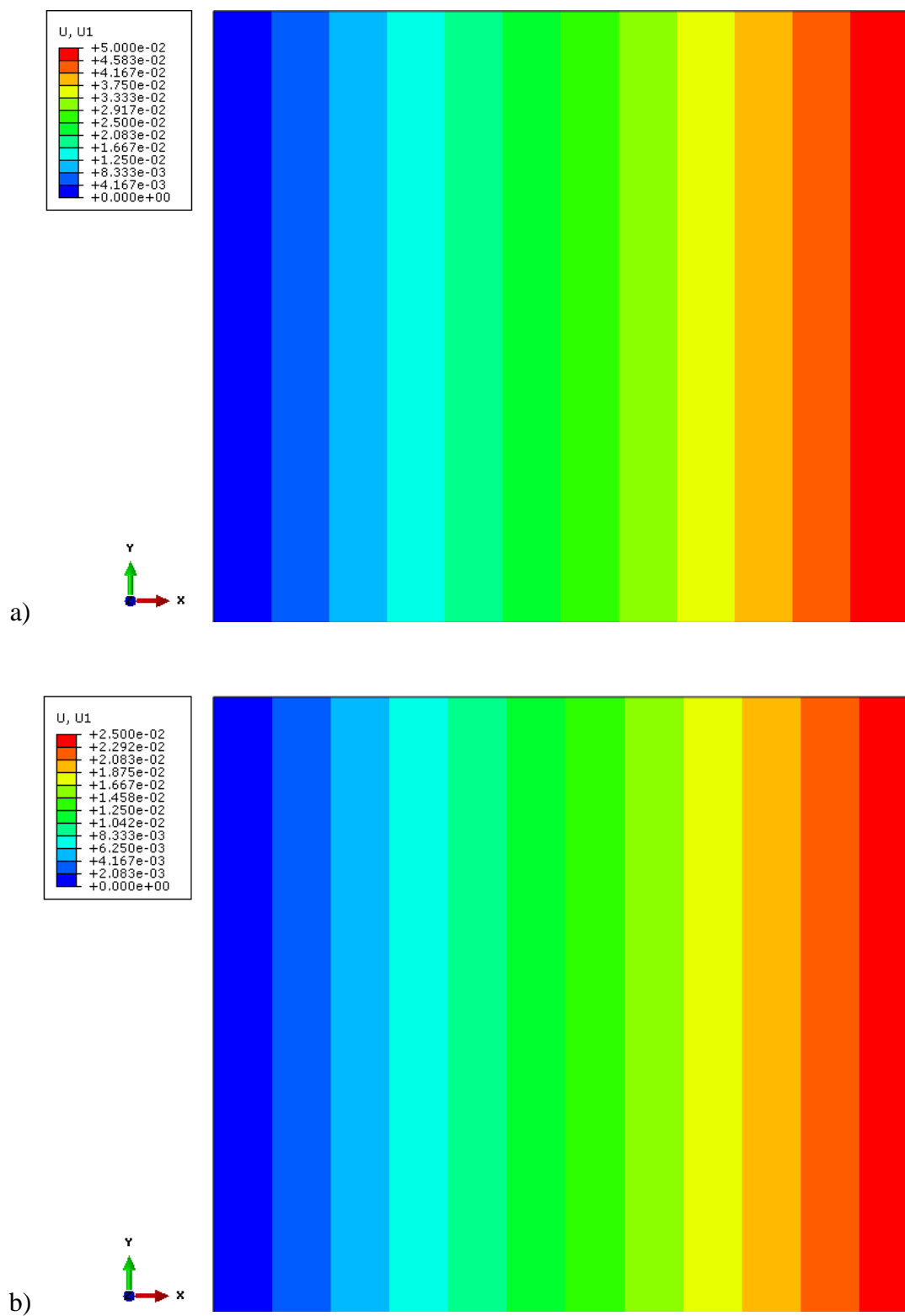
**Slika 3.4. Četvrtina ploče opterećena konstantnim tlakom**

Na slici 3.5 prikazana je raspodjela normalnih naprezanja u smjeru osi  $x$  u početnom i krajnjem trenutku.



**Slika 3.5. Polje naprezanja S11 u: a) početnom i b) krajnjem trenutku**

Slika 3.6 prikazuje raspodjelu pomaka u smjeru osi  $x$  u početnom i krajnjem trenutku.



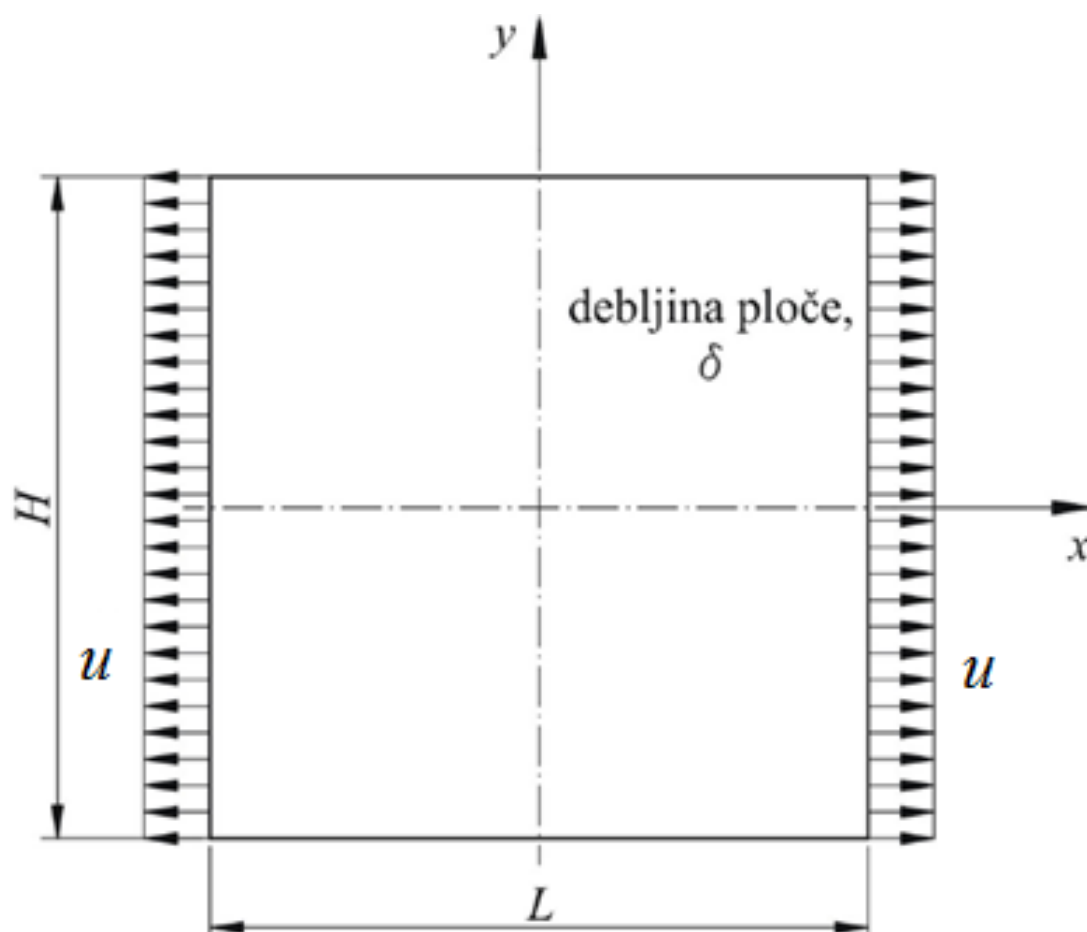
Slika 3.6. Pomak u smjeru osi  $x$  u: a) početnom i b) krajnjem trenutku

### 3.2.1. Analitičko rješenje za opterećenje pomakom

Zadani podaci prikazani su u izrazu (2.1), te je zadano opterećenje u ovom slučaju pomak

$$u_x = 0,025 \text{ mm}$$

Slika 3.7 prikazuje ploču zadanih dimenzija opterećenu konstantnim kontinuiranim pomakom u smjeru osi  $x$ ,  $u_x = 0,025 \text{ mm}$ .



Slika 3.7. Ploča 200x200x1 mm opterećena pomakom [6]

Relativna deformacija u smjeru osi  $x$ :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta L}{2}}{\frac{L}{2}} = \frac{u_x}{\frac{L}{2}} = 0,00025. \quad (2.9)$$

Relativna deformacija u smjeru osi  $y$ :

$$\sigma_y = E \frac{\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x}{1 - \nu^2} = 0 \Rightarrow \varepsilon_y + \nu \varepsilon_x = 0 \Rightarrow \varepsilon_y = -0,000075. \quad (2.10)$$

Relativni pomak u smjeru osi  $x$ :

$$u_x = 0,025 \text{ mm}. \quad (2.11)$$

Relativni pomak u smjeru osi  $y$ :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta H}{2}}{\frac{H}{2}} = \frac{u_y}{\frac{H}{2}} \Rightarrow u_y = \varepsilon_y \cdot \frac{H}{2} = -0,0075 \text{ mm}. \quad (2.12)$$

Ukupno naprezanje u smjeru osi  $x$ :

$$\sigma_x = E \frac{\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y}{1 - \nu^2} + \sigma_x^z = 50 \text{ MPa} + 100 \text{ MPa} = 150 \text{ MPa}. \quad (2.13)$$

Ukupno naprezanje u smjeru osi  $y$ :

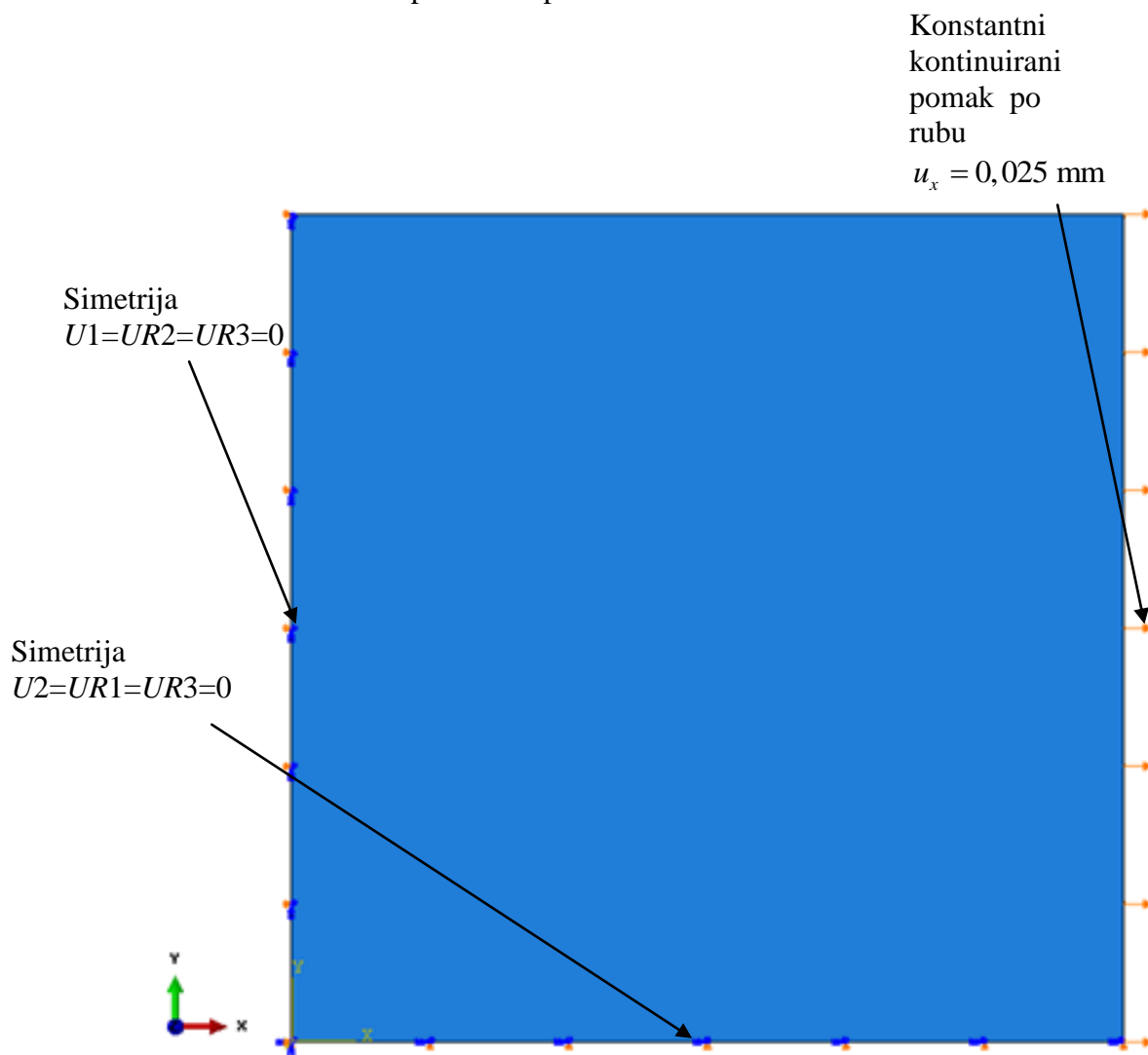
$$\sigma_y = 0 \quad (2.14)$$

### 3.2.2. Numeričko rješenje za ploču opterećenu pomakom

Analogno opterećenju tlakom, ovdje se također uzima četvrtina ploče u prvoj analizi opterećena tlakom  $p^1 = 100 \text{ MPa}$ , dok je u drugoj opterećena pomakom  $u = 0,025 \text{ mm}$  po desnom rubu uz povlačenje rezultata iz prve analize zadanih u *Predefined Field - Initial State*.

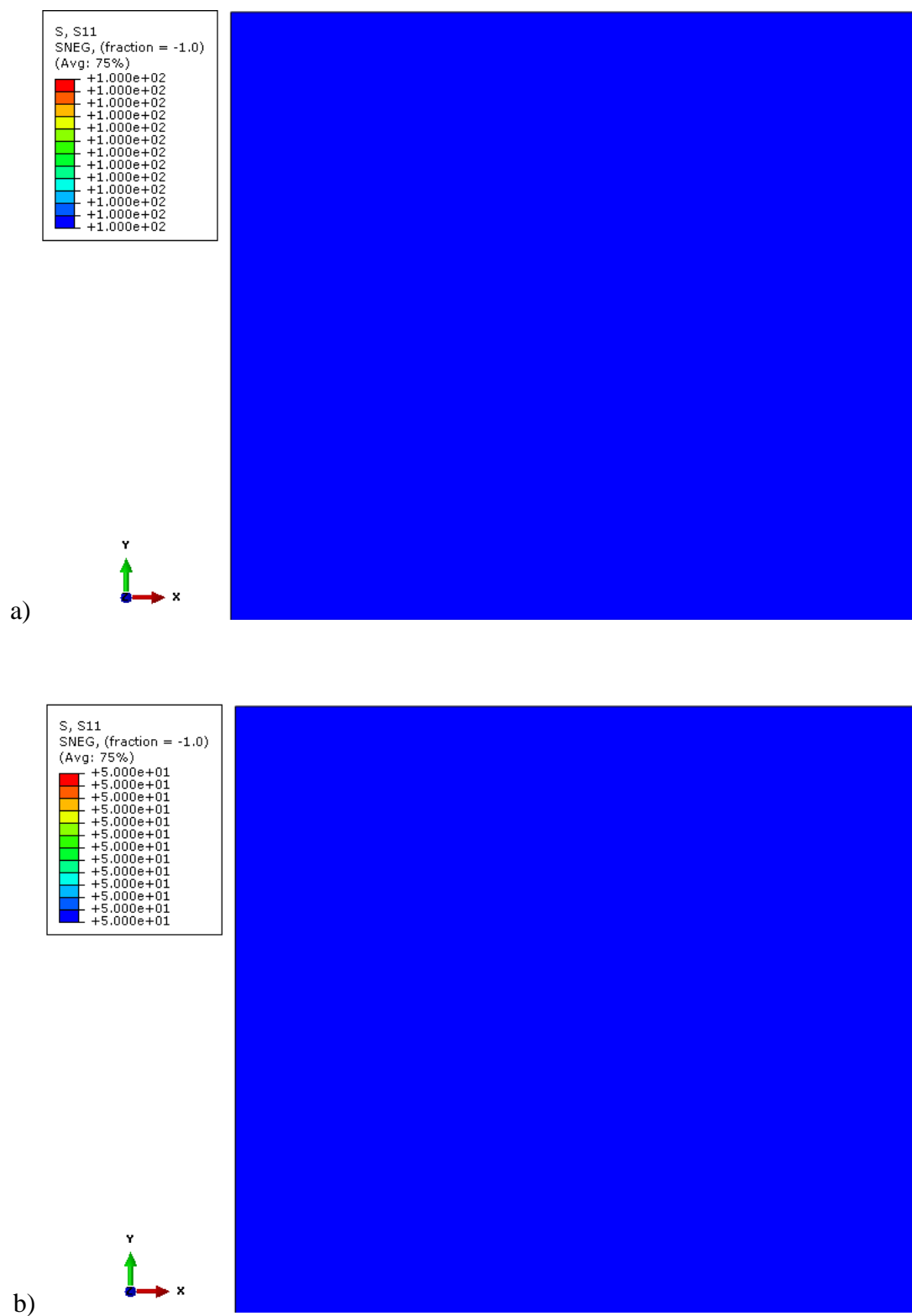
Četvrtina ploče također je opisana jednim S4R konačnim ljuskastim elementom u obje analize. S4R konačni elementi su opisani u poglavlju 2.1. Diskretizacija četvrtine ploče prikazana je na slici 3.3.

Na slici 3.8 prikazana je četvrtina ploče sa zadanim uvjetima simetrije te opterećena konstantnim kontinuiranim pomakom po rubu.



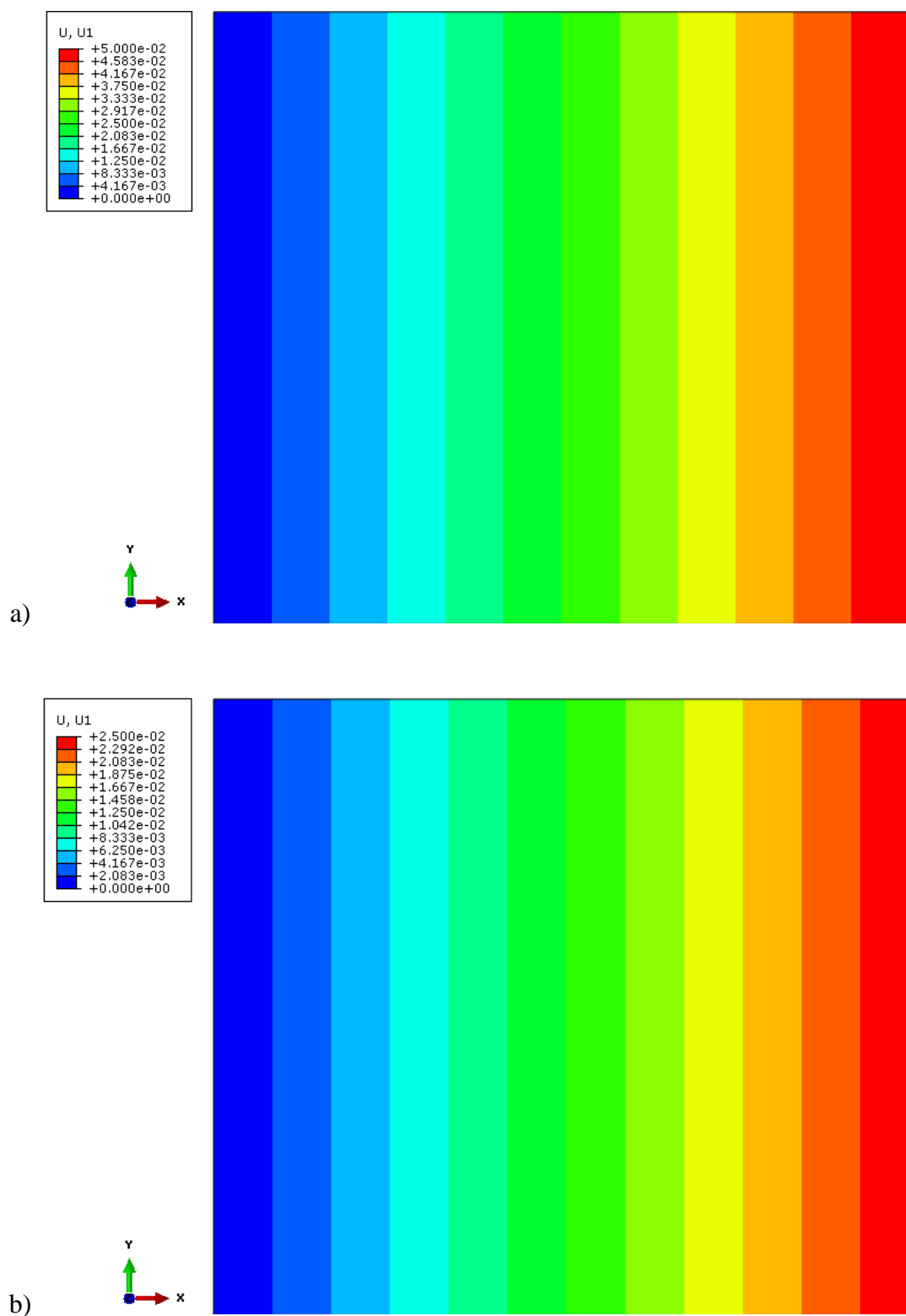
Slika 3.8. Četvrtina ploče opterećena pomakom

Na slici 3.9 prikazana je raspodjela normalnih naprezanja u smjeru osi  $x$  u početnom i krajnjem trenutku.



**Slika 3.9. Polje naprezanja S11 u: a) početnom i b) krajnjem trenutku**

Na slici 3.10 prikazana je raspodjela pomaka u smjeru osi  $x$  u početnom i krajnjem trenutku.



**Slika 3.10. Pomak u smjeru osi  $x$  u: a) početnom i b) krajnjem trenutku**



### 3.2.3. Zaključak

Vidljivo je iz rezultata numeričkih rješenja, da se naprezanja razlikuju od očekivanih vrijednosti dobivenih analitičkim postupkom. Naime, opcijom *Predefined Fields - Initial State* (opcija *Predefined Fields - Stress* radi samo na *continuum* elementima, pa je korišten *Initial State*) smo uspjeli integrirati rezultate prve analize u početne uvjete druge analize na *shell* elementima, ali ih nismo uspjeli zadržati u daljnjem djelu analize. Potrebno je dalje istražiti mogućnosti navedene opcije u obujmu projekta ili diplomskog rada.

#### 4. NUMERIČKA ANALIZA ZAOSTALIH NAPREZANJA ISPUŠNOG KUĆIŠTA PLINSKE TURBINE

Za izmjerene vrijednosti pomaka rubova *linera*, nastalih prilikom preddeformiranja *linera* prije zavarivanja prikazanim na slici 4.1, bilo je potrebno napraviti numerički model koji sa zadanim potrebnim rubnim uvjetima i opterećenjem može dobro opisati izmjerene pomake. Numeričkom analizom izrađenog modela izračunata je raspodjela naprezanja koja se javljaju pri izmjerenim pomacima dobivenim od strane tvrke Alstom.

##### Predeformation of liners end radius



Presentation title - 18/11/2013 - P 25

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

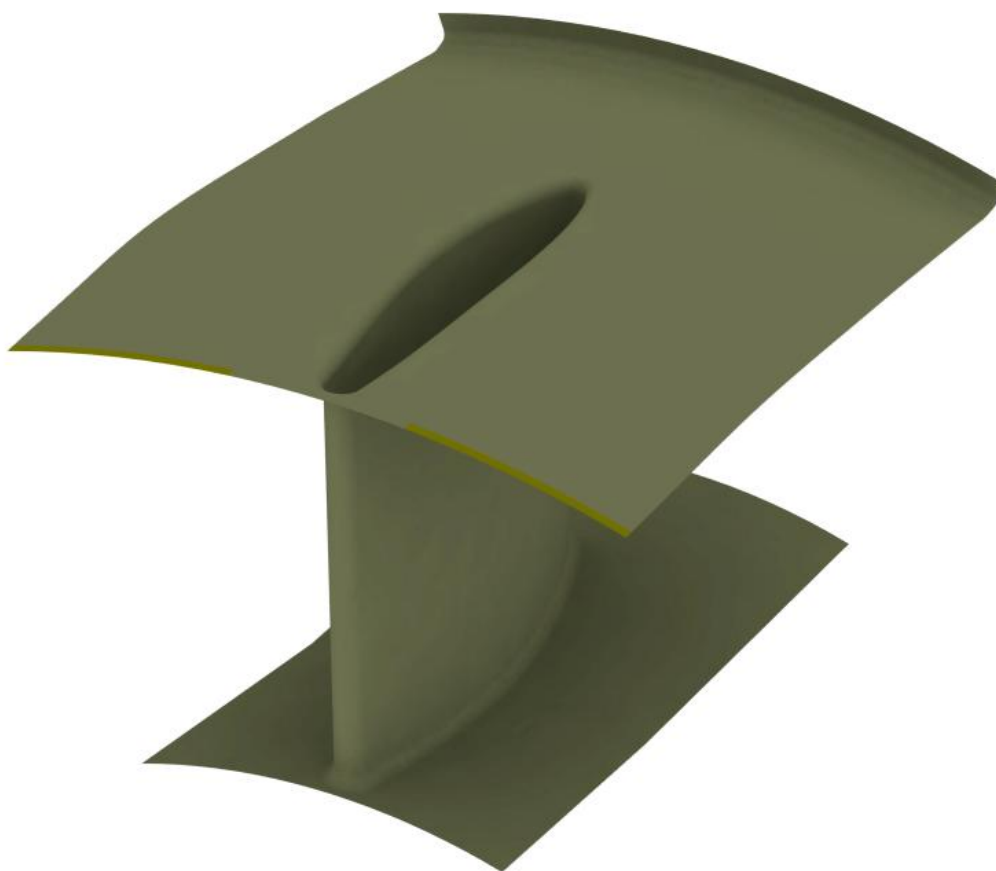
**ALSTOM**

Slika 4.1. Preddeformacija *linera* [5]

Na slici 4.1 kotirani su izmjereni pomaci rubova *linera* preddeformiranog kako bi se moglo izvršiti zavarivanje rebara između dvije cilindrične ljuske te kako bi i nakon zavarivanja oblik ljuski bio što više cilindričan, kako je objašnjeno u poglavlju 1.1.1.

Za analizu zaostalih naprezanja u ispušnom kućištu, odnosno *lineru*, koristeći uvjete simetrije, uzeta je desetina *linera* prikazana na slici 4.2. Uzimanjem samo desetine razmatrane konstrukcije znatno se pojednostavljuje analiza i smanjuje vrijeme računanja. Rezultati se kasnije lako mogu prikazati za cijelu razmatranu konstrukciju.

Numerički model desetine *linera* je prikazana na slici 4.2.



**Slika 4.2. Numerički model desetine *linera***

#### **4.1. Svojstva materijala i presjeka**

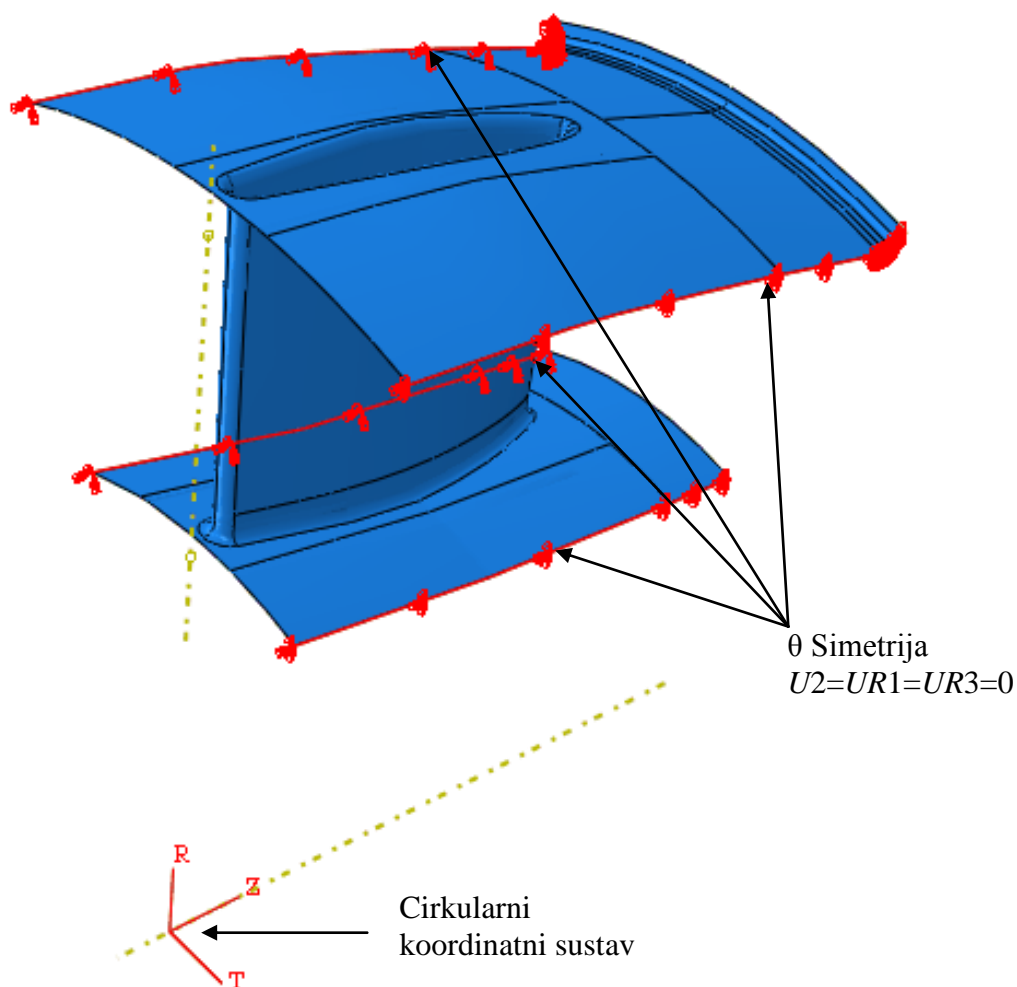
Za materijal su zadana svojstva modula elastičnosti  $E = 200 \text{ GPa}$ , te Poissonova faktora  $\nu = 0,3$ . Debljina ljuske cijelog modela iznosi  $t = 8 \text{ mm}$ .

## 4.2. Rubni uvjeti simetrije

Kako je naznačeno u uvodu poglavlja 4, da bi se analiza mogla izvršiti na desetini *linera*, potrebno je pravilno zadati rubne uvjete na rubovima na kojima vlada simetrija. Zadani rubni uvjeti simetrije prikazani su na slici 4.3.

Da bi se rubni uvjeti (kako simetrije, tako i opterećenja kasnije) mogli pravilno opisati, potrebno je dobro zadati koordinatni sustav u kojem će rubni uvjeti moći biti dobro opisani.

U zadanom slučaju radi se osnosimetričnom problemu koji se opisuje pomoću cirkularnog koordinatnog sustava, također prikazanog na slici 4.3.



Slika 4.3. Rubni uvjeti simetrije

Koordinatni sustav je zadan na način da se os  $z$  poklapa s glavnom osi rotacije, odnosno simetrije. Os  $r$  predstavlja radijalnu os, dok os  $\vartheta$  predstavlja cirkularnu os. Bitno je naglasiti da je os  $\vartheta$  postavljena tako da kod rebra iznosi 0 te u lijevom, odnosno desnom rubu iznosi

$$\vartheta = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{10} = \pm \frac{\pi}{10}. \text{ Prema tome os } \vartheta \text{ ima domen } \vartheta \in \left[-\frac{\pi}{10}, \frac{\pi}{10}\right] \text{ za zadani model.}$$

Uvjet simetrije u zadanom slučaju je simetrija u cirkularnom smjeru pa treba spriječiti pomak u cirkularnom smjeru, te zakrete oko osi  $r$ , odnosno  $z$ .

U programskom paketu Abaqus oznake za pomake u smjerovima osi su  $u_r \equiv U1$ ,  $u_\vartheta \equiv U2$ ,  $u_z \equiv U3$ , pa je prema tome uzet rubni uvjet simetrije koji sprečava pomak u cirkularnom smjeru  $U2 = 0$ , te zakrete oko osi  $r$  i  $z$ , odnosno  $UR1=0$ ,  $UR3=0$ .

### 4.3. Rubni uvjeti opterećenja

Kako je prikazano na slici 4.1, unutarnja i vanjska ljuska *linera* su pomaknute za određeni iznos te će se navedeni pomaci uzimati kao opterećenja. Navedeni pomaci su u radijalnom smjeru te je to opterećenje potrebno matematički opisati.

Vrijednosti očitane sa slike 4.1 prevedene u cilindrični koordinatni sustav zadan prema slici 4.3 su:

- za vanjski rub:

$$\begin{aligned} \vartheta = 0 & \rightarrow u_r \approx 0 \\ \vartheta \approx \frac{1}{3} \frac{\pi}{10} & \rightarrow u_r = 3,5 \text{ mm} \\ \vartheta = \frac{\pi}{10} & \rightarrow u_r = 11 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.15)$$

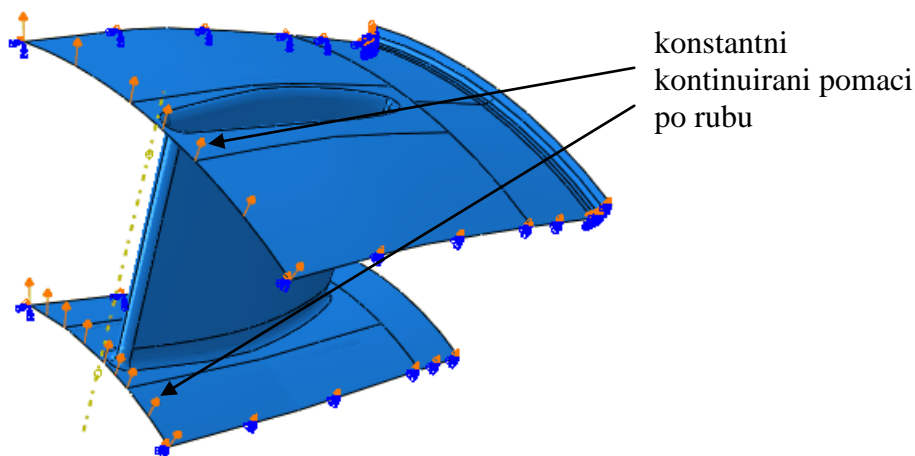
- za unutarnji rub:

$$\begin{aligned} \vartheta = 0 & \rightarrow u_r \approx 0 \\ \vartheta = \frac{\pi}{10} & \rightarrow u_r = 2 \div 3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ispitana su tri načina opisivanja kontinuirane funkcije pomaka po opterećenom rubu, odnosno tri načina opterećenja:

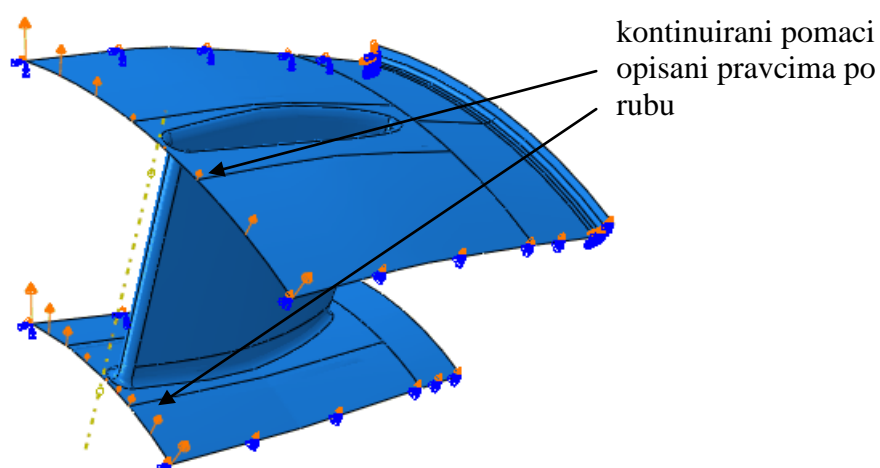
1. Konstantni kontinuirani pomak na vanjskom ( $u_r = 5 \text{ mm}$ ) i unutarnjem rubu ( $u_r = 1 \text{ mm}$ ).
2. Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan pravcima  $u_r = \frac{110}{\pi} \cdot \vartheta$  za vanjski rub, te  $u_r = \frac{25}{\pi} \cdot \vartheta$  za unutarnji rub.
3. Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan trigonometrijskom funkcijom  $u_r = 5,5 - 5,5 \cdot \cos(10 \cdot \vartheta)$  za vanjski rub, te  $u_r = 1,25 - 1,25 \cdot \cos(10 \cdot \vartheta)$  za unutarnji rub.

Slika 4.4 prikazuje rubove opterećene konstantnim kontinuiranim pomacima navedenim pod 1. načinom opterećivanja.



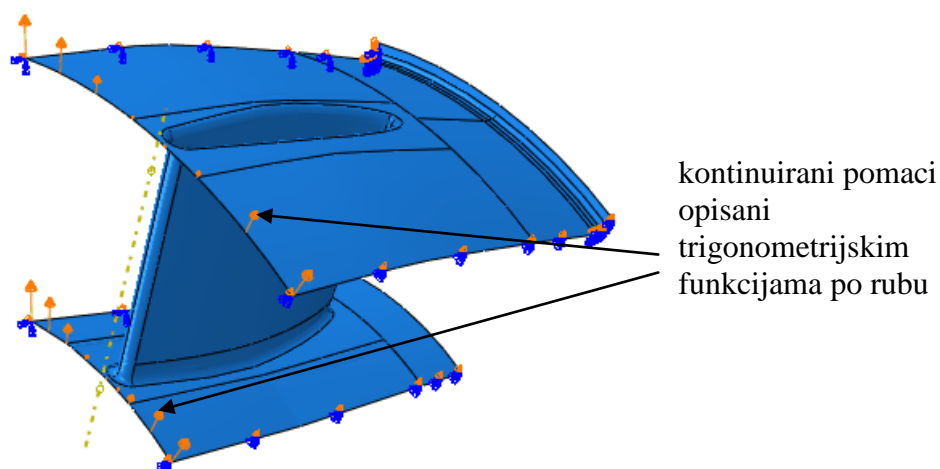
**Slika 4.4. Konstantni kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu**

Slika 4.5 prikazuje rubove opterećene kontinuiranim pomacima opisanim pravcima navedenim pod 2. načinom opterećivanja.



**Slika 4.5. Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan pravicima**

Slika 4.6 prikazuje rubove opterećene kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama navedenim pod 3. načinom opterećivanja.

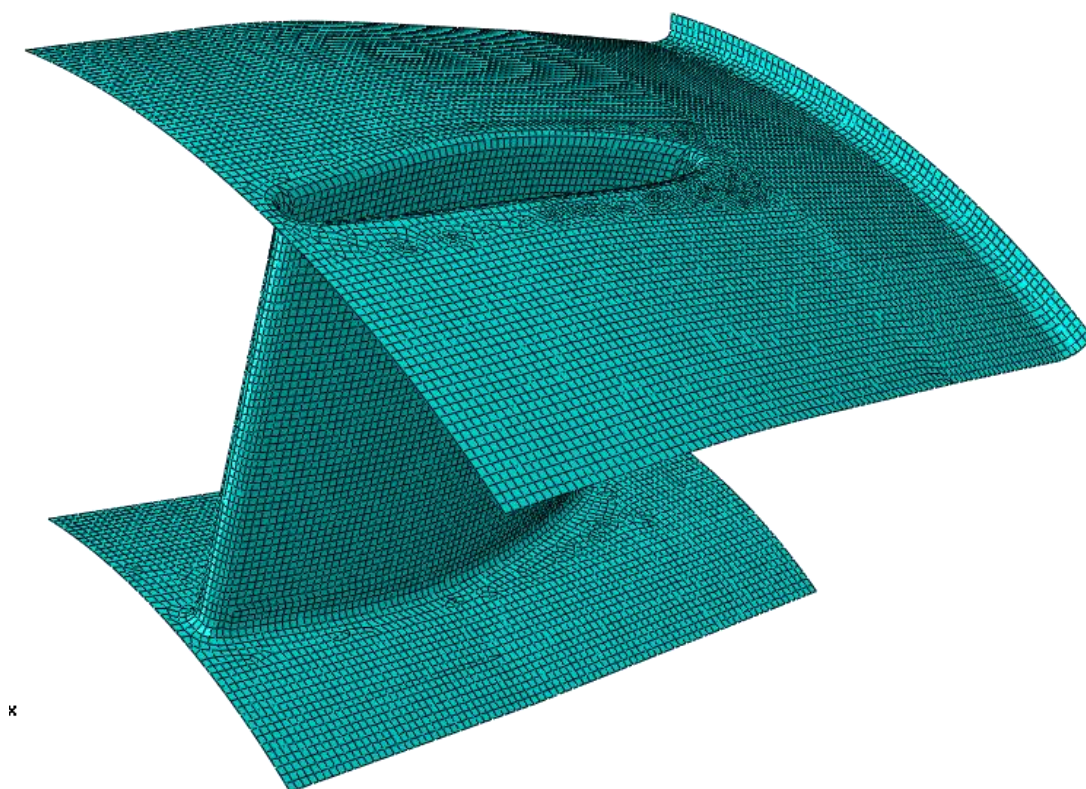


**Slika 4.6. Kontinuirani pomak na vanjskom i unutarnjem rubu opisan trigonometrijskim funkcijama**

#### 4.4. Diskretizacija modela

Model za numeričku analizu diskretiziran je pomoću četverokutnih ljuskastih konačnih elemenata prvog reda s reduciranom integracijom, S4R [3].

Diskretizacija modela je prikazana na slici 4.7.



**Slika 4.7. Diskretizirani model desetine *linera***

Za daljnju, točniju analizu bit će potrebna i gušća mreža, no za sada ćemo se zadovoljiti sa ovom raspodjelom elemenata i gustoćom mreže.

## **4.5. Rezultati numeričke analize**

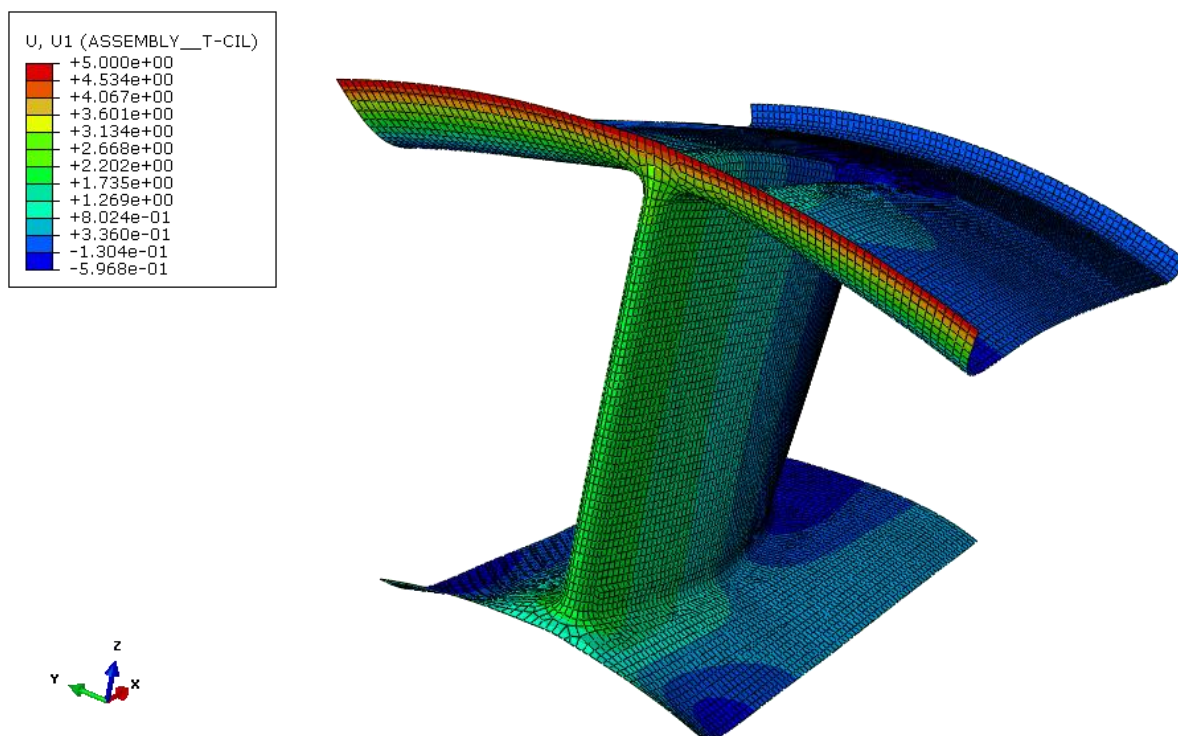
### **4.5.1. Pomaci u smjeru $r$**

Na sljedećim slikama je prikazana raspodjela pomaka u smjeru osi  $r$  koordinatnog sustava zadanog pod 4.2. na deformiranom modelu desetine *linera*, te ista raspodjela prikazana na punom *lineru*, koristeći uvjete simetrije.

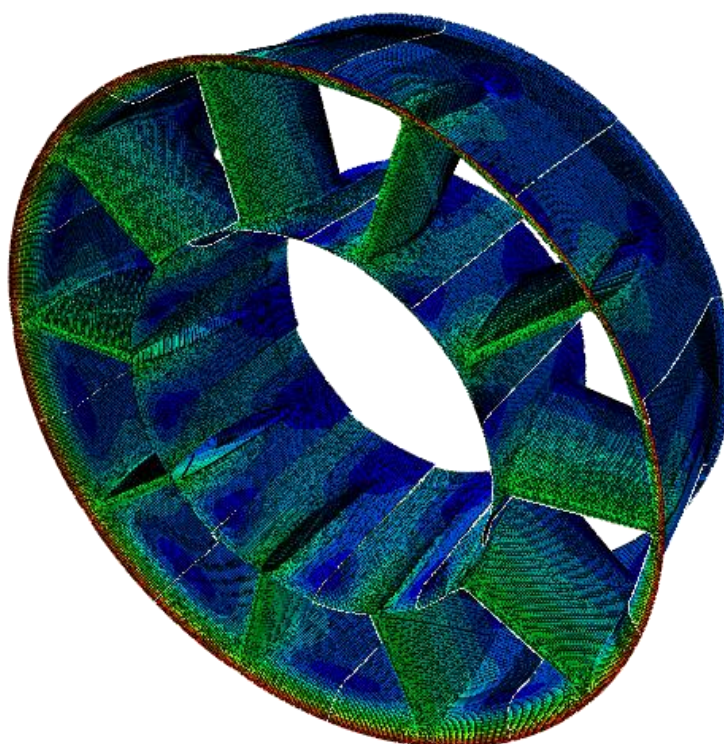
Na slici 4.8 je prikazana raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom konstantnim kontinuiranim pomacima po unutarnjem i vanjskom rubu, definirani pod 1. načinom opterećivanja.

Na slici 4.9 je prikazana raspodjela istog polja pomaka po cijelom *lineru*, koristeći uvjete simetrije.



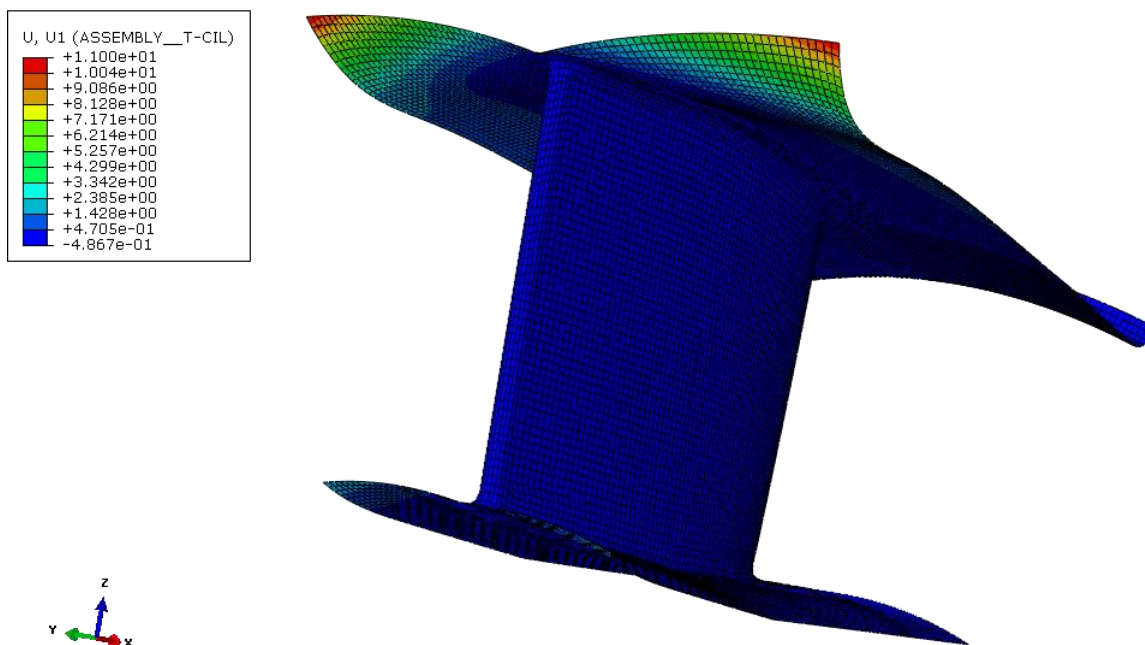


Slika 4.8. Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom konstantnim kontinuiranim pomacima na unutarnjem i vanjskom rubu

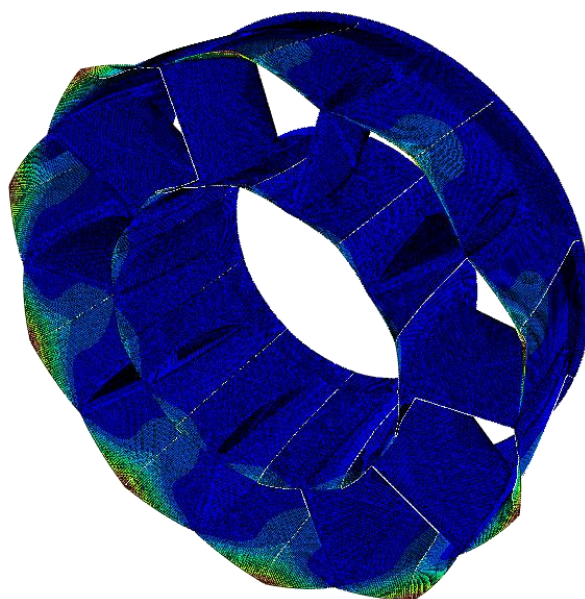


Slika 4.9. Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom *lineru* za model opterećen konstantnim kontinuiranim pomacima na unutarnjem i vanjskom rubu

Na slici 4.10 prikazana je raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom konstantnim kontinuiranim pomacima po unutarnjem i vanjskom rubu, definirani pod 2. načinom opterećivanja, dok je na slici 4.11, koristeći uvjete simetrije, prikazana raspodjela pomaka po cijelom *lineru*.



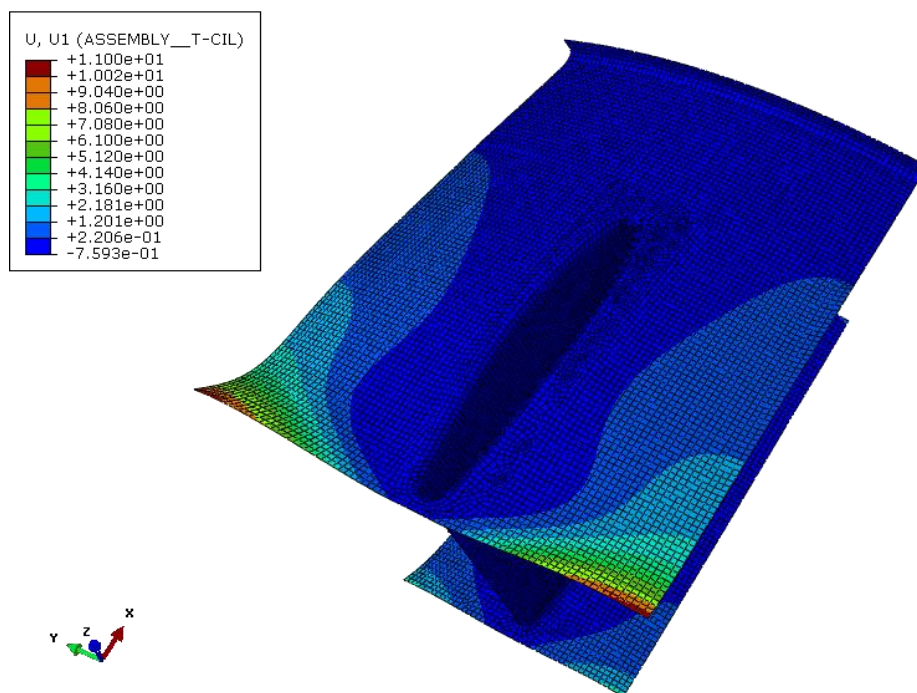
**Slika 4.10.** Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim pravcima na unutarnjem i vanjskom rubu



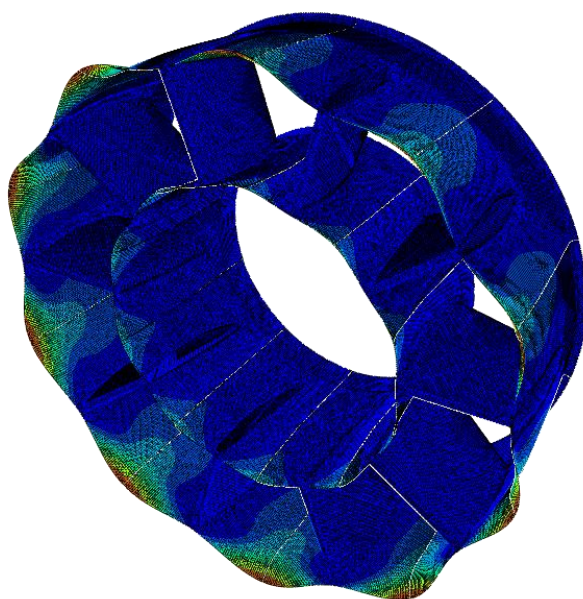
**Slika 4.11.** Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom *lineru* za model opterećen kontinuiranim pomacima opisanim pravcima na unutarnjem i vanjskom rubu

Na slici 4.12 je prikazana raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom konstantnim kontinuiranim pomacima po unutarnjem i vanjskom rubu, definiranim pod 3. načinom opterećivanja

Na slici 4.13 je dan prikaz polja pomaka za cijeli *liner*, koristeći uvjete simetrije.



**Slika 4.12.** Raspodjela pomaka na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu

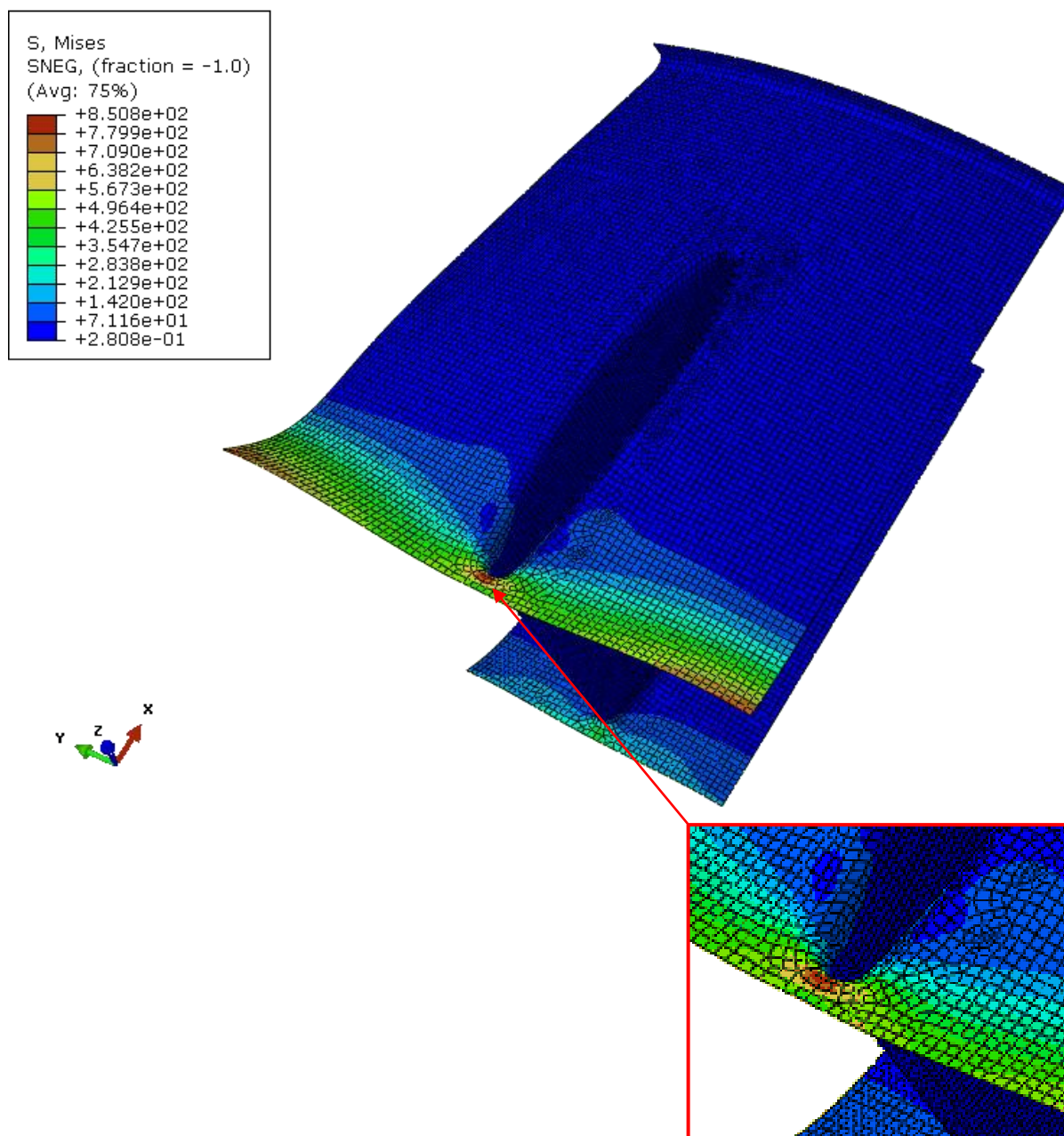


**Slika 4.13.** Raspodjela pomaka prikazanog po cijelom *lineru* za model opterećen kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu



#### 4.5.2. Ekvivalentna naprezanja

Kao što je vidljivo iz slika 4.8 do 4.13, raspodjela pomaka je najrealnije opisana kod opterećenja pomakom opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu. Za taj slučaj je prikazana raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu jedne desetine *linera* na slici 4.14.



**Slika 4.14. Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu**

Iz slike 4.14 vidljivo je da se najveća koncentracija naprezanja pojavljuje u području geometrijskih diskontinuiteta, kako je bilo i očekivano. Da bi pobliže ispitali ponašanje modela u području diskontinuiteta, koristit ćemo se metodom adaptivnog umrežavanja. Rezultati korištenja iste su prikazani u poglavlju 4.7.

Također, numeričke vrijednosti naprezanja su prilično visoke, pa je dana kratka usporedba s drugačijim rubnim uvjetima u poglavlju 4.6.

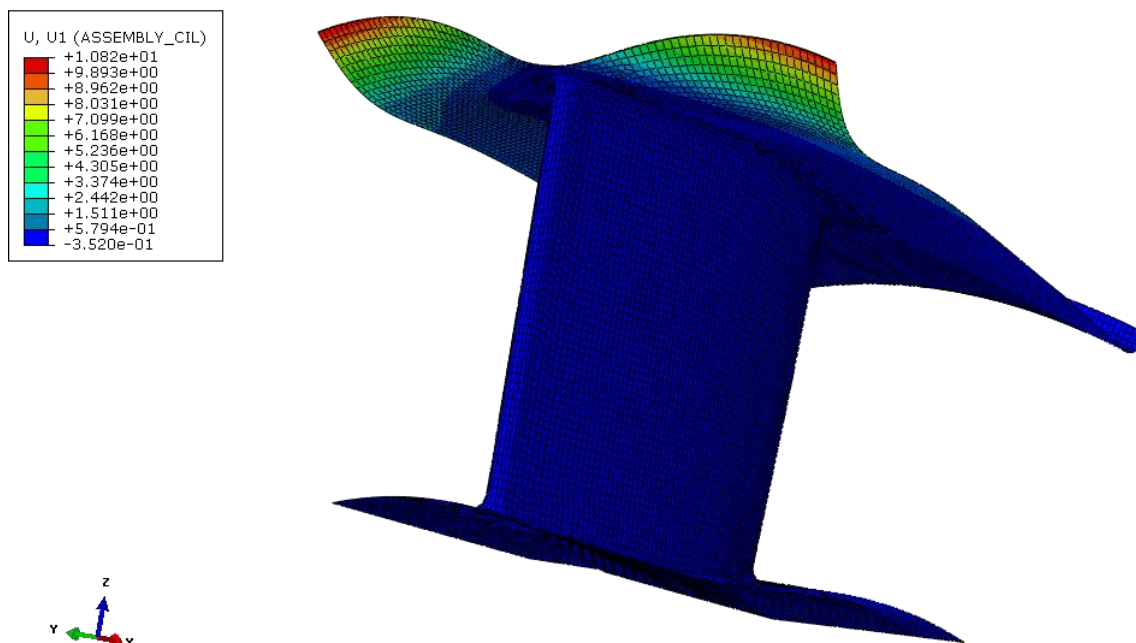
#### **4.6. Usporedba naprezanja i raspodjele pomaka sa modelom opterećenim kontinuiranim tlakom po vanjskom rubu**

Kako je vidljivo iz slike 4.14, naprezanja su prilično visoka za zadanu vrstu opterećenja, pa je isti model opterećen samo kontinuiranim tlakom po vanjskom rubu na nekoliko različitih načina od kojih je prikazan način čija raspodjela pomaka najviše sliči raspodjeli pomaka dobivenoj na modelu opterećenom kontinuiranim pomakom opisanim trigonometrijskim funkcijama po rubu (slika 4.13).

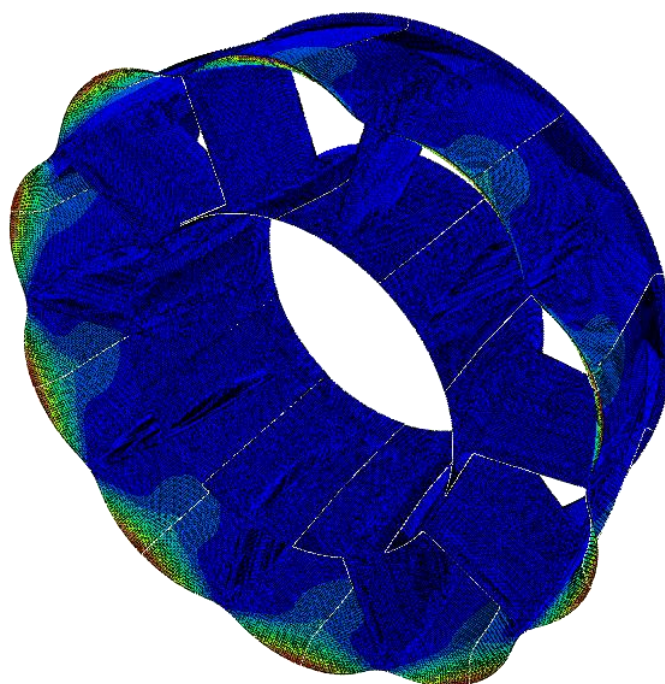
Razmatrani su modeli opterećeni konstantnim tlakom po rubu opisani istim funkcijama kao u poglavlju 4.3. Amplitude opterećenja su izabrane iterativnim postupkom ne bi li se dobio pomak vanjske ljuske na mjestu  $\vartheta = \frac{\pi}{10}$  približno  $w = 11$  mm.

Raspodjela pomaka dobivena na modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu je najbližnja raspodjeli pomaka dobivenoj na modelu opterećenom kontinuiranim pomakom opisanim trigonometrijskim funkcijama po rubu (slika 4.13) pa su rezultati prikazani samo za taj slučaj.

Na slici 4.15 je prikazana raspodjela pomaka u smjeru osi  $r$  na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu. Analogno poglavlju 4.5.1., na slici 4.16 prikazana je raspodjela pomaka po cijelom *lineru*.

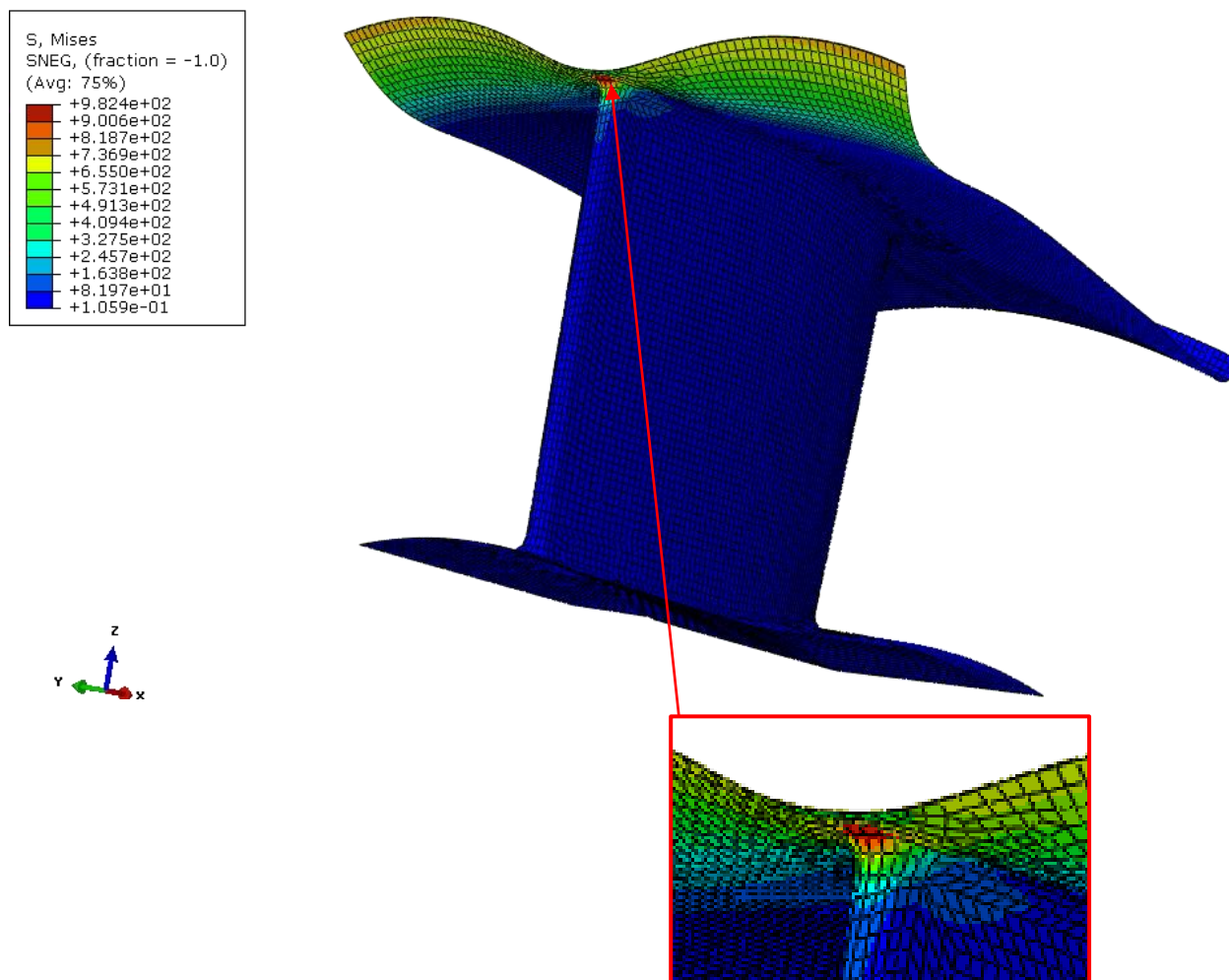


Slika 4.15. Raspodjela pomaka u smjeru osi  $r$  na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu



Slika 4.16. Raspodjela pomaka u prikazanog na cijelom *lineru* za model opterećen konstantnim tlakom po vanjskom rubu

Na slici 4.17 je prikazana raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu.



**Slika 4.17. Raspodjela naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu**

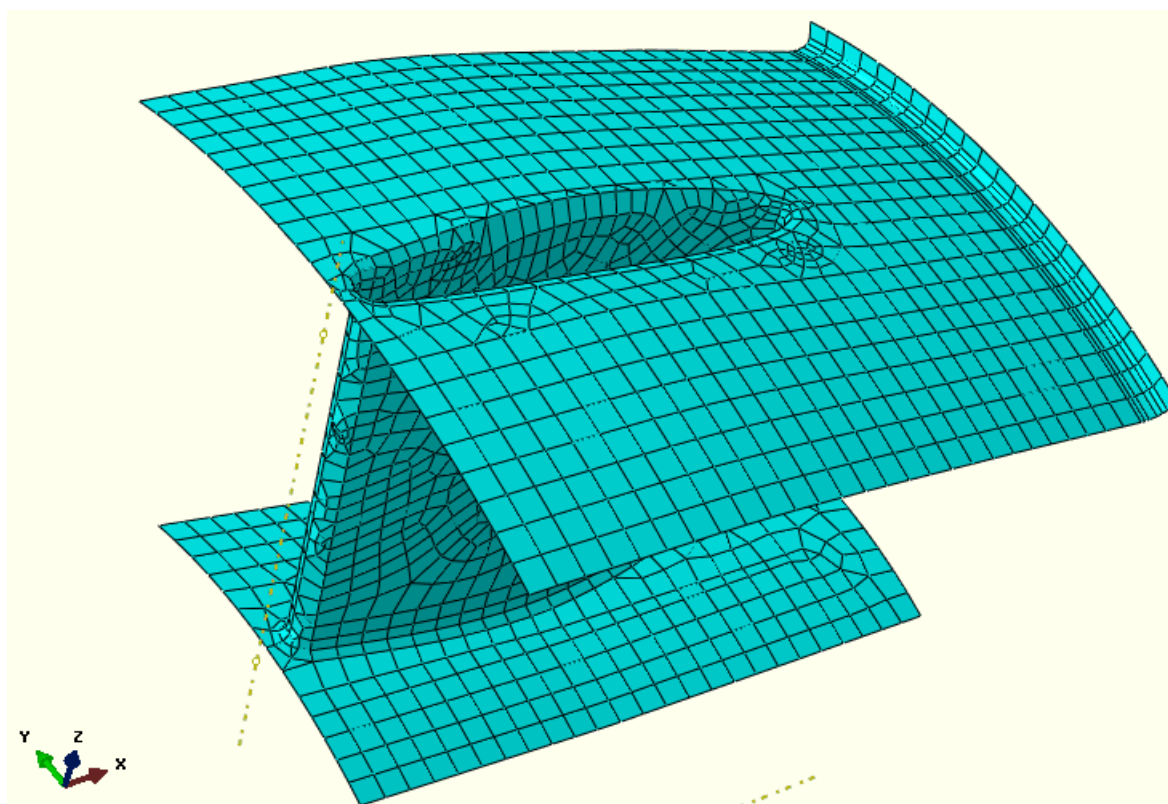
Iz slike Slika 4.17 vidljivo je da su naprezanja dobivena na modelu opterećenom konstantnim tlakom po vanjskom rubu istog reda veličine kao naprezanja dobivena na modelu opterećenom kontinuiranim pomakom opisanim trigonometrijskim funkcijama po rubu.

#### 4.7. Razmatranje koncentracije naprezanja u području geometrijskih diskontinuiteta primjenom metode adaptivnog umrežavanja

Metoda adaptivnog umrežavanja (*eng. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) adaptive meshing*) je jedna od opcija u programskom paketu Abaqus kojom se nakon izvršene simulacije na određenom području u modelu, po odabranom kriteriju u određenom broju iteracija, progušćuje mreža. Tako će npr. na mjestima velikih gradijenata naprezanja, program automatski profiniti mrežu, dok će mjesta s malim promjenama biti relativno grublje diskretizirana što također povoljno utječe na potrebno vrijeme računanja. [4]

U razmatranom problemu, najprije je bilo potrebno napraviti grublju mrežu od korištene mreže prikazane na slici 4.7. Nova, grublja, diskretizacija prikazana je na slici 4.18.

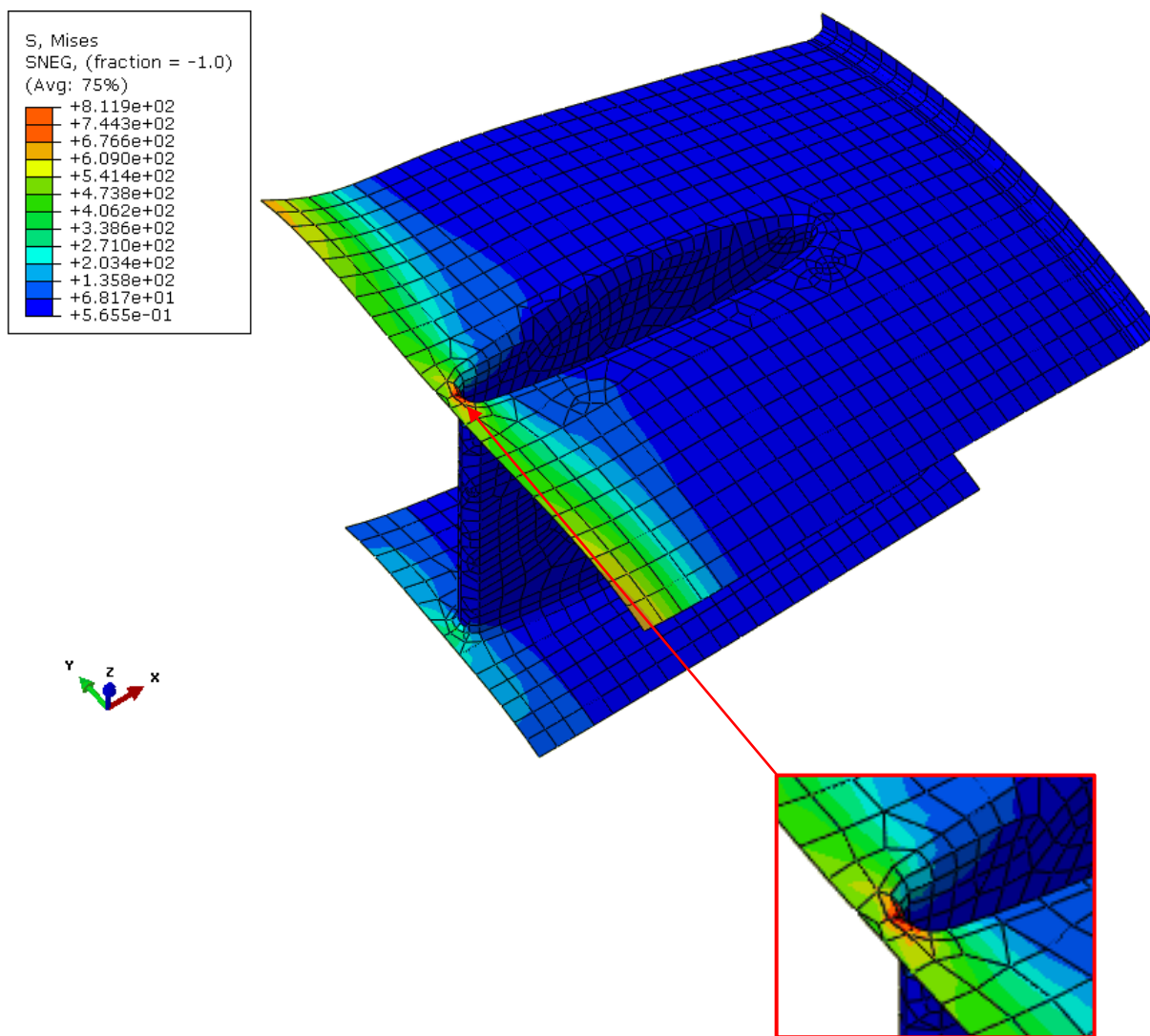
Daljnja analiza temelji se na modelu opterećenom kontinuiranim pomacima opisanim trigonometrijskim funkcijama na unutarnjem i vanjskom rubu prikazanim pod 3.načinom opterećivanja, ispitanog kroz tri iteracije.



Slika 4.18. Diskretizacija numeričkog modela u prvoj iteraciji

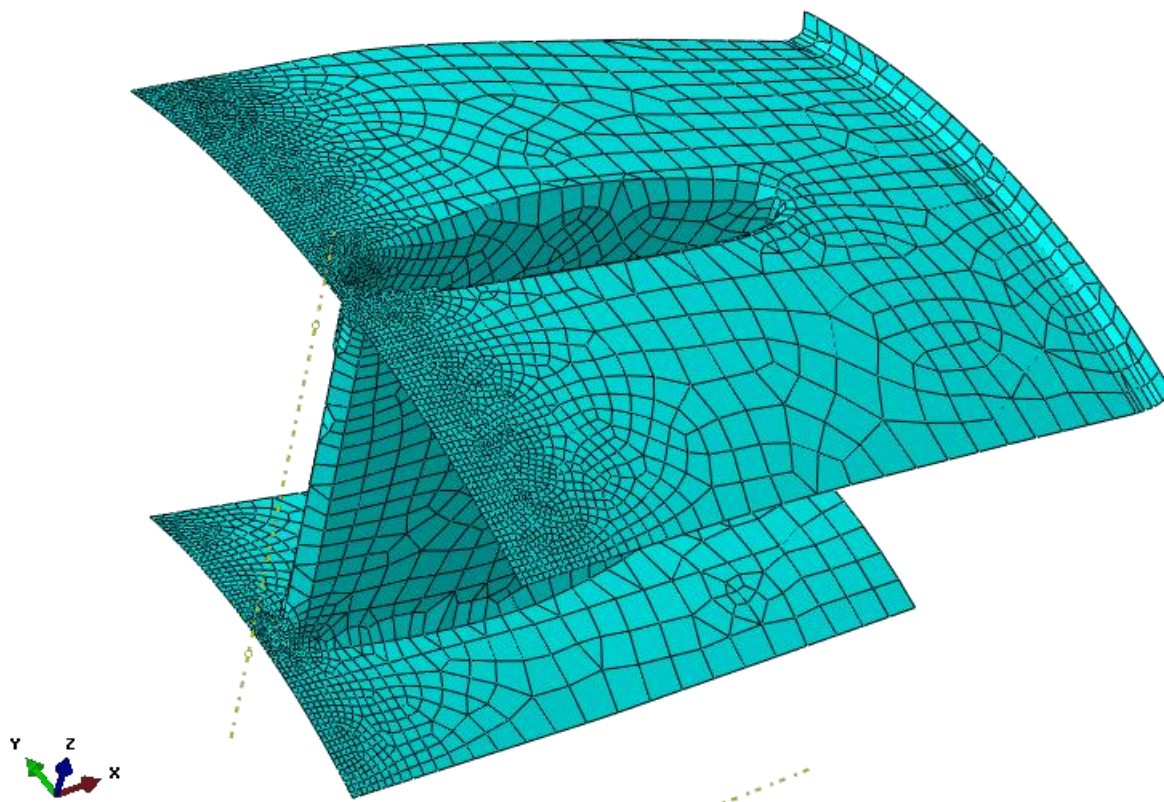


Za diskretizaciju u prvoj iteraciji prikazanu na slici 4.18, polje ekvivalentnih naprežanja po Von Misesu prikazano je na slici 4.19.



**Slika 4.19.** Polje ekvivalentnih naprežanja po Von Misesu na deformiranom modelu u prvoj iteraciji

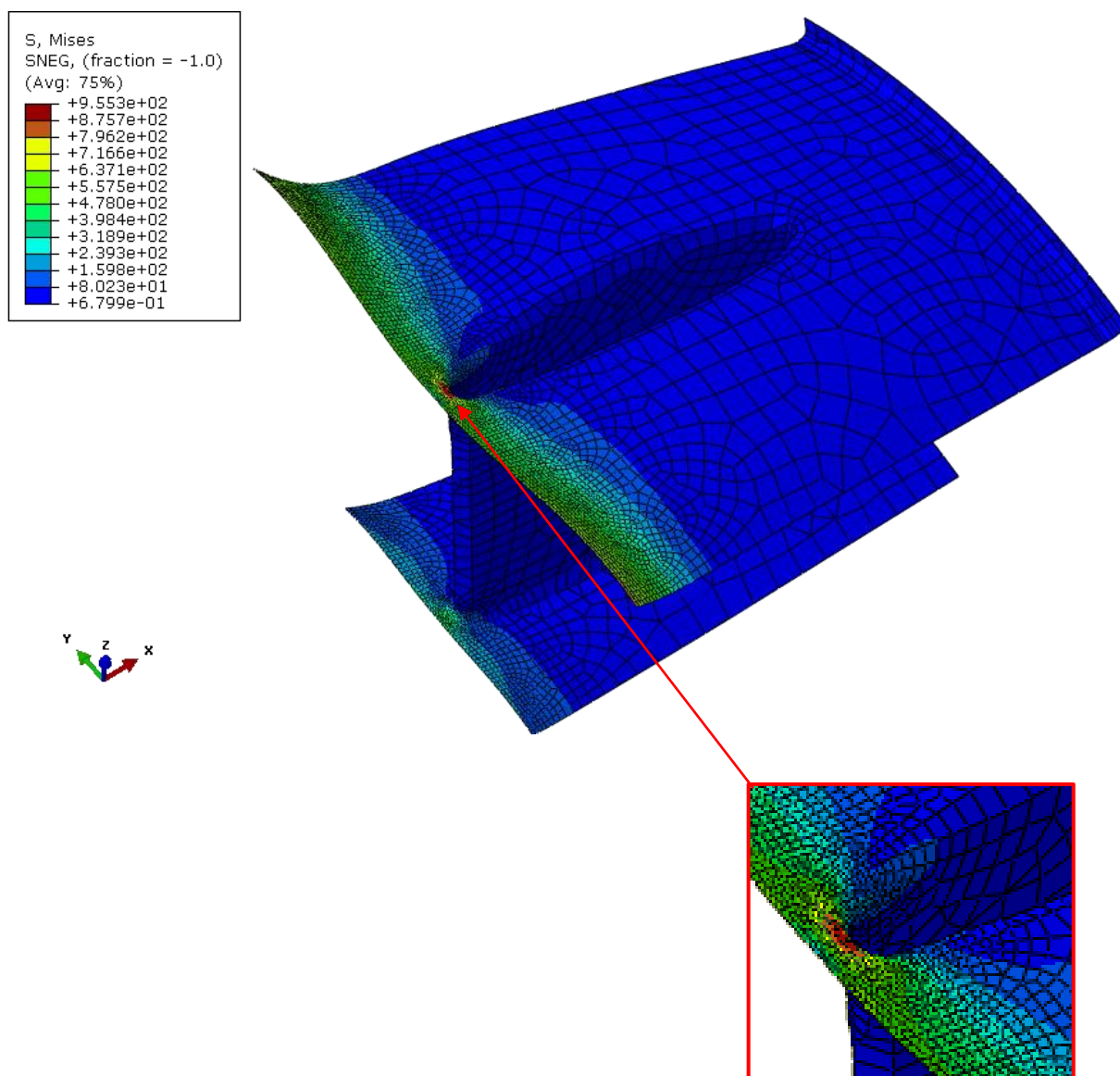
Nakon prve iteracije, program automatski radi novu diskretizaciju, na način da na mjestima velikih promjena veličina proglašuje mrežu. Diskretizacija u novoj, drugoj iteraciji prikazana je na slici 4.20.



**Slika 4.20. Diskretizacija numeričkog modela u drugoj iteraciji**

Kao što je vidljivo na slici 4.20, mreža je usitnjena na mjestima na kojima su se pojavila najviša naprezanja u prethodnoj iteraciji.

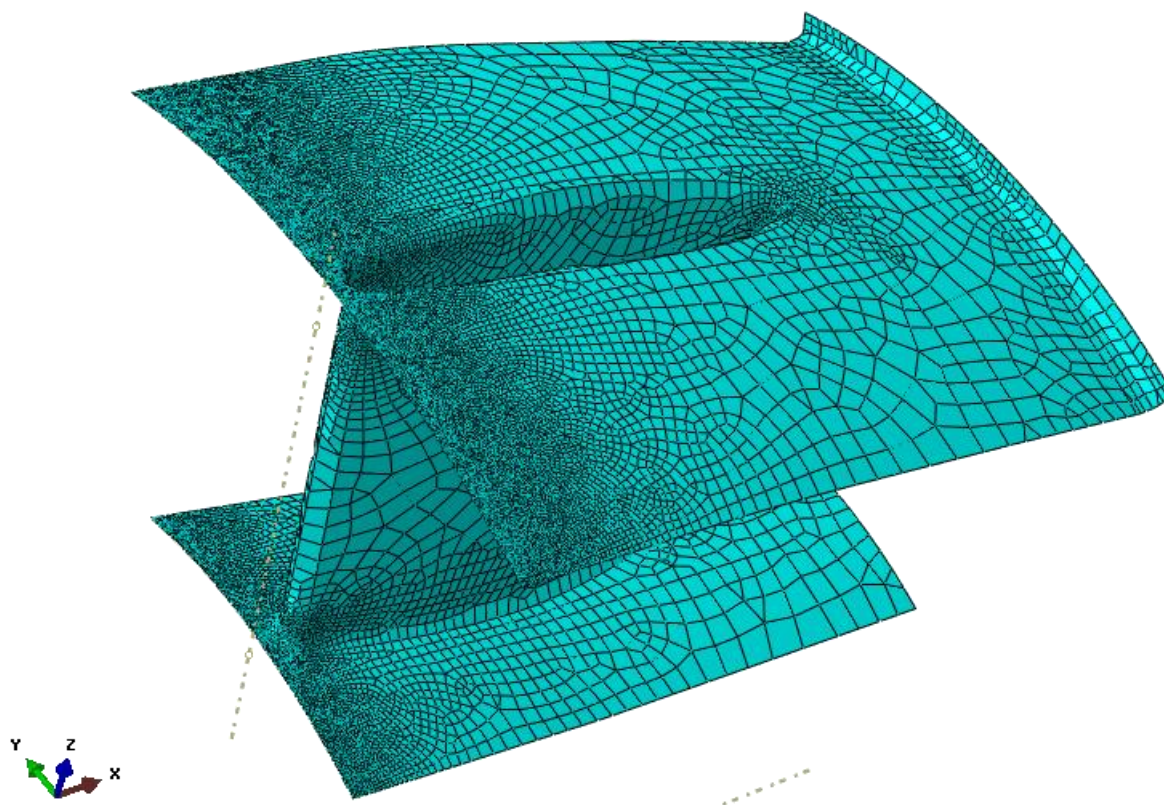
Analizom modela diskretiziranog prema slici 4.20, dobivamo novu raspodjelu ekvivalentnih naprezanja, prikazanih na slici 4.21.



**Slika 4.21. Polje ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu u drugoj iteraciji**

Iz slike 4.21 vidljivo je da se na mjestu geometrijskih diskontinuiteta, gdje je mreža usitnjena, vrijednosti naprezanja povećavaju u odnosu na vrijednosti dobivene prvom iteracijom.

Prema rezultatima dobivenim u drugoj iteraciji, radi se nova diskretizacija po već opisanom pomaku. Nova diskretizacija prikazana je na slici 4.22.

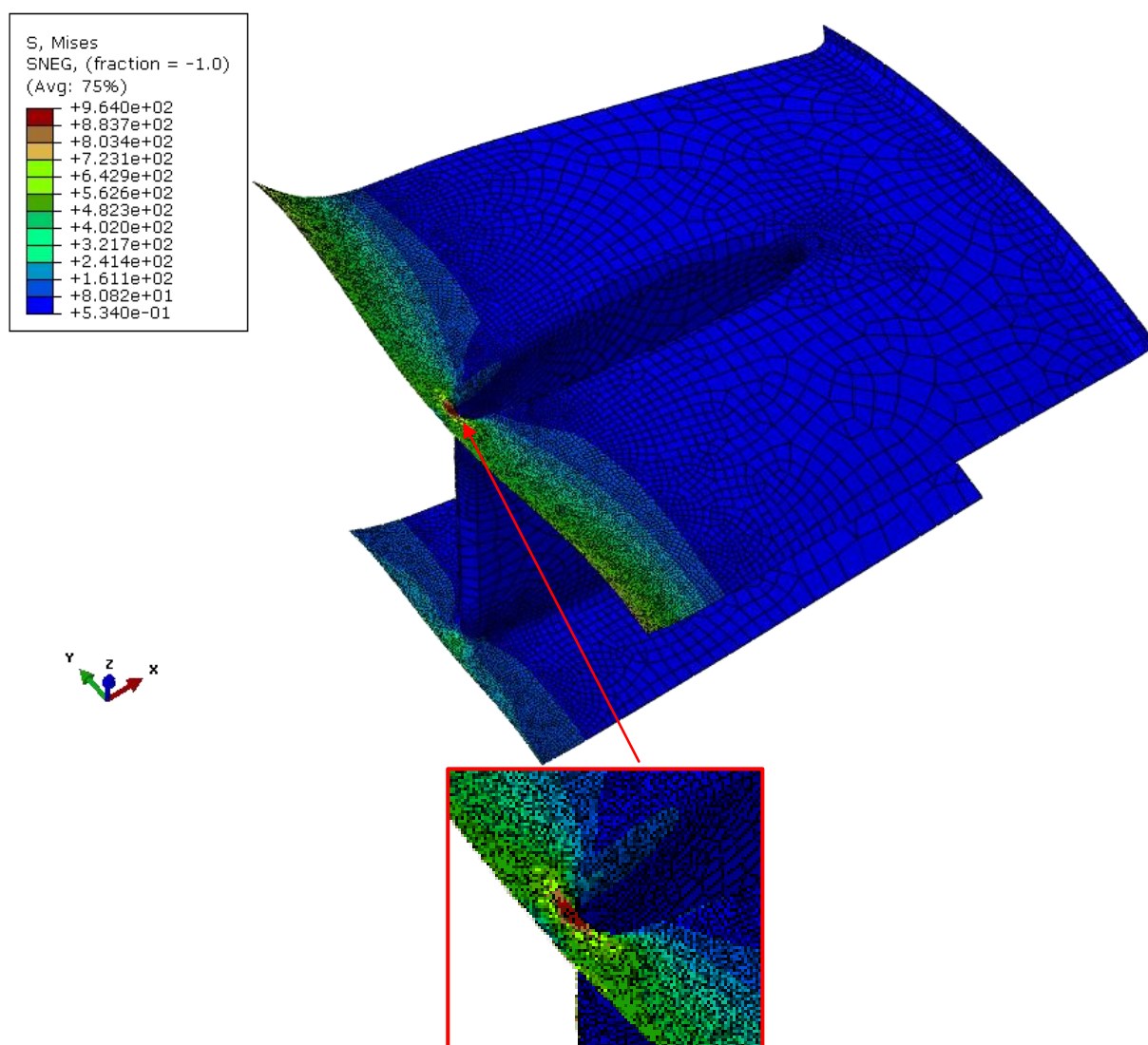


**Slika 4.22. Diskretizacija numeričkog modela u trećoj iteraciji**

Iz slike 4.22 vidljivo je kako su područja na kojima su se pojavila najviša naprezanja sada još gušće diskretizirana.

Na slici 4.23 prikazana je raspodjela ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu u trećoj iteraciji, na diskretizaciji prikazanoj na slici 4.22.

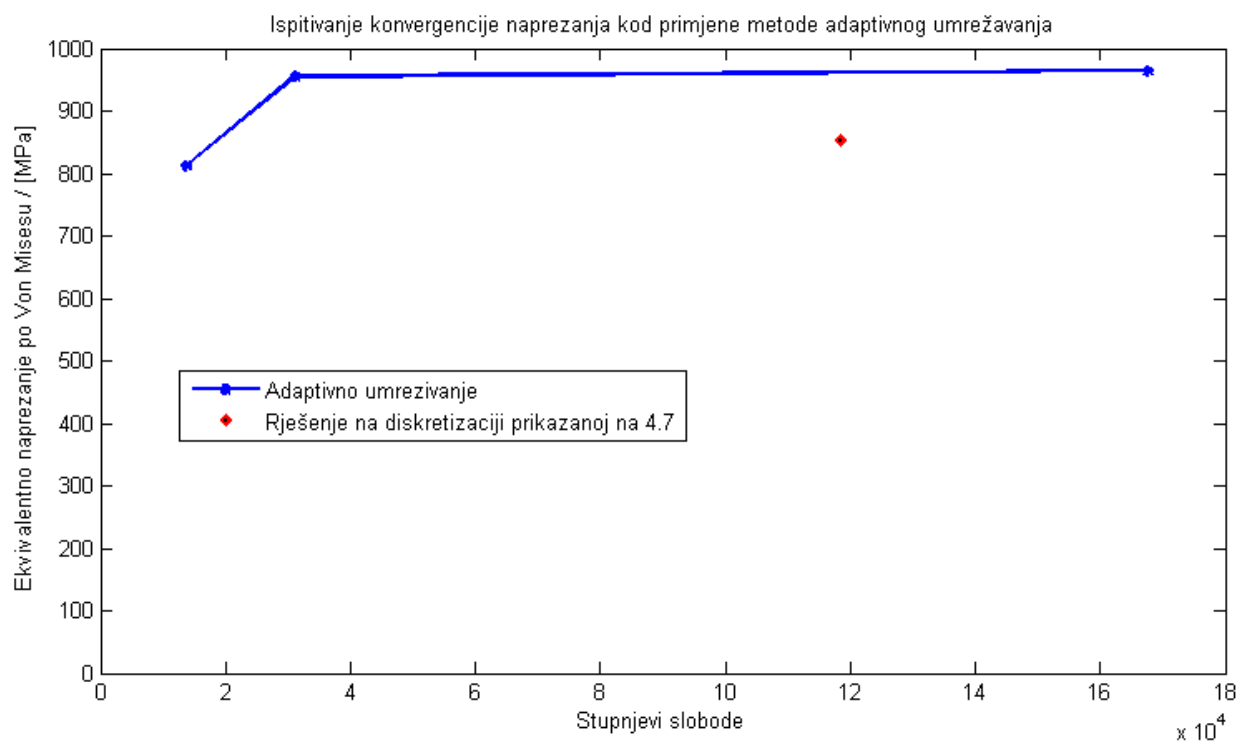




**Slika 4.23. Polje ekvivalentnih naprezanja po Von Misesu na deformiranom modelu u trećoj iteraciji**

#### 4.7.1. Konvergencija ekvivalentnih naprezanja primjenom metode adaptivnog umrežavanja

U dijagramu na slici 4.24 prikazana je konvergencija rješenja dobivena kroz tri iteracije prikazane u ovom poglavlju.



Slika 4.24. Dijagramski prikaz konvergencije ekvivalentnih naprezanja

## 5. ZAKLJUČAK

Korištenje metode konačnih elemenata doprinijelo je jednostavnijoj analizi kompleksnih problema, za koje u puno slučajeva ne postoji analitičko rješenje ili je ono vrlo složeno. Tako je bilo i u ovom primjeru koji je sam po sebi složen zbog složene geometrije te ne postoji analitičko rješenje za ispitane načine opterećenja. Konačni elementi S4R konvergiraju za način opterećenja u obliku pomaka po rubu što je vidljivo iz slike 2.11 te ih je bilo ispravno koristiti u sklopu numeričke analize.

Od tri ispitana načina opterećenja u obliku pomaka po rubu modela, pomak zadan u obliku trigonometrijske funkcije kosinus daje najrealniji izgled deformiranog modela te je za njega pomnije analizirana koncentracija naprezanja koja se javlja u području geometrijskih diskontinuiteta, primjenom metode adaptivnog umrežavanja. Na slici 4.24 vidljivo je da se postiže konvergencija ekvivalentnih naprezanja u području geometrijskih diskontinuiteta. Također treba naglasiti da su dobivena naprezanja znatno veća od očekivanih, odnosno realnih, te bi se trebalo bolje izmjeriti dobivene pomake nakon preddeformacije, odnosno analizu izvršiti na modelu bez poklopca. U svakom slučaju, rezultati dobivena naprezanja nisu zanemariva te je potrebno obratiti više pažnje na sprječavanje nastajanja istih ili njihovo smanjenje nakon nastajanja.

Nadalje, da bi dobivene rezultate zaostalih naprezanja moglo lakše uklopiti u daljnje analize ispušnog kućišta pri zavarivanjem te pri radnim opterećenjem, bit će potrebno pomnije istražiti opciju prebacivanja rezultata između analiza. Na taj bi se način dobivena zaostala naprezanja mogla superponirati s izračunatim naprezanjima u numeričkoj analizi zavarivanja ili radnog opterećenja.

## LITERATURA

- [1] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/katedra3/Nastava/toplinske\\_turbine\\_novo/12%20SteamGas.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra3/Nastava/toplinske_turbine_novo/12%20SteamGas.pdf)
- [2] <http://www.alstom.com/group/about-us/>
- [3] ABAQUS, Abaqus Software: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.
- [4] ABAQUS, Abaqus Documentation: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.
- [5] Alstom\_dobiveni\_materijali
- [6] Podloge za vježbe iz kolegija „Metoda konačnih elemenata” za ABAQUS/CAE
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>
- [8] SW501F EXHAUST LIFE EXTENSION SDR for Alstom



## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**